



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROYECTO FINAL DE GRADO

TITULO: Desarrollo de un sistema compacto para la medición de propiedades atenuadoras de zapatillas deportivas.

AUTOR : Marc Schmidt

TITULACIÓN: Grado en ingeniería electrónica industrial y automática

DIRECTOR: Joaquin del Rio

DEPARTAMENTO: 710, Ingeniería electrónica

Fecha: 3/07/13

TITULO: Desarrollo de un sistema compacto para la medición de propiedades atenuadoras de zapatillas deportivas.

APELLIDOS: Schmidt

NOMBRE: Marc

TITULACIÓN: Ingeniería electrónica y automática

ESPECIALIDAD: Electrónica

PLAN: Grado

DIRECTOR: Joaquin del Río

DEPARTAMENTO: 710, Ingeniería electrónica

CALIFICACIÓN DEL TFG

TRIBUNAL

PRESIDENTE SECRETARIO

VOCAL

FECHA DE LECTURA: 16 de Julio de 2013

Este proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales: No

PROYECTO FINAL DE CARRERA

RESUMEN

En este proyecto se ha tratado de desarrollar un sistema compacto para la medición de propiedades atenuadoras de suelas en zapatillas. El sistema debería de permitir calcular la amortiguación con un unico ensayo de impacto realizado. Un sistema así en la actualidad no existe y aportaría mejoras a los actuales procesos en los que se trata de medir características atenuadoras.

Para conseguir el objetivo mencionado se ha desarrollado básicamente un sistema inalámbrico de plantillas instrumentadas. Para ello se han hecho dos plantillas instrumentadas con cada una 2 sensores piezoeléctricos del tipo PZT. Estos sensores se han calibrado mediante una sistema de presión de aire. A las plantillas con los sensores se les ha conectado un circuito acondicionador y un módulo inalámbrico de envío. El circuito y el módulo de envío se han incorporado en una caja con un cinturón que permite así un uso inalámbrico del sistema. Para efectuar la recepción de la información se ha colocado un módulo de recepción conectado a un ordenador. Para hacer funcionar el módulo de envío y recepción de manera correcta y lo más rápida posible se ha tenido que hacer su completa programación de los microprocesadores incluidos en estos. Finalmente se ha desarrollado una aplicación Labview capaz de procesar los datos y mostrarlos de manera entendedora.

El sistema esta básicamente pensado para poder colocar una plantilla en la suela del zapato y la otra plantilla en el interior del zapato. De esta manera se miden las presiones que se ejercen en esas dos partes. El programa de Labview es capaz de mostrar los datos de manera visual de presión en la parte superior, inferior y efectuar una resta. Efectuando la resta de las dos presiones en suela y interior se ha pensado efectuar conclusiones sobre la amortiguación de la suela. La idea era que si en la parte interior se midiese menos presión que en la parte de la suela habría sucedido una atenuación del impacto.

Se hicieron ensayos con un impacto humano y se pudieron denotar diferencias tal y como comentado anteriormente. No obstante pocos días antes de entregar el proyecto, al tratar de hacer una explicación del proceso a nivel de diagrama de fuerzas se vio que el sistema presenta un error teórico. La fuerza en la parte inferior como en la interior debe ser igual en cada momento.

Dado lo comentado anteriormente el sistema no es válido para medir la atenuación producida por las suelas de zapato de manera compacta y mediante un unico ensayo a pesar de los resultados que se han obtenido. El sistema si que es capaz de medir las presiones que suceden en las plantillas tal y como cualquier otro sistema de plantillas instrumentadas.

Mediante un uso indirecto, tal y como se hacen en las metodolgías actuales para la medición de las propiedades atenuadoras de zapatos deportivos, si sería posible. Se pensó incluso en realizar un estudio sobre la amortiguación producida por las suelas de zapato dado un impacto humano. No existe ningún estudio que haya hecho esto. No obstante dado que el error teórico apareció pocos días antes de la entrega del proyecto y la memoria e resumen IEEE ya estaban casi acabados y totalmente enfocados al tema del sistema compacto no se pudo realizar dicho estudio.

Palabras clave:

Biomecánica	Amortiguación	Atenuación	S i s t e m a inalámbrico
P l a n t i l l a s instrumentadas	S i s t e m a adquisición	S e n s o r piezoeléctricos	

1.Introducción y objetivo del proyecto.....	9
1.1.Introducción.....	9
1.2.Resumen metodologías par ala medición de propiedades atenuadoras de zapatos.....	9
1.1.2.Ejemplos y observaciones.....	10
1.2.Objetivo.....	11
2.Estado del arte.....	13
2.1.Estándar para la medición de las propiedades atenuadoras (ASTM F1614).....	13
2.2.Sistemas para la generación de fuerzas en los zapatos.....	13
2.2.1.Maquinas.....	13
2.2.2.Humanos.....	15
2.3.Medición de las fuerzas que ocurren en el interior del zapato al aplicar una fuerza externa.....	17
2.4.Sistema de plantillas instrumentadas.....	18
2.4.1.Definición:.....	18
2.4.2.Composición:.....	18
2.4.3.Sistemas de plantillas instrumentadas en el mercado.....	20
2.4.3.1.Pedar-X.....	20
2.4.3.2. Biofoot.....	24
2.5. Plataformas dinamométricas.....	28
2.6.Acelerómetros.....	29
3.Desarrollo del sistema de adquisición.....	31
3.1.Visión global.....	31
3.1.1.Características técnicas sistema.....	33
3.1.2.Características técnicas suelas.....	33
3.2.Plantillas instrumentadas.....	34
3.3.1.Función del bloque.....	34

3.3.2.Descripción del hardware.....	34
3.2.1.Plantillas.....	36
3.2.2.Sensores piezoeléctricos.....	37
3.2.2.1.Caracterización de los sensores piezoeléctricos.....	40
3.2.2.2.Montaje adicional piezos.....	42
3.2.3. Cable plano.....	43
3.3.Placa de acondicionamiento.....	44
3.3.1.Función del bloque.....	44
3.3.2.Descripción del hardware.....	44
3.4.Módulos de recepción y de envío.....	46
3.4.1.Función del bloque.....	46
3.4.1.Módulo de envío.....	46
3.4.1.1.Función del módulo.....	46
3.4.1.2.Descripción del hardware.....	46
3.4.2.Módulo de recepción.....	51
3.4.2.1.Función del módulo.....	51
3.4.2.2.Descripción del hardware.....	51
3.5.Accesorios para el uso.....	55
3.5.1.Sistema de transporte.....	54
3.6.Software para la programación de los módulos de envío y recepción.....	57
3.6.1.Diagrama de flujo XBee envío.....	59
3.6.2.Diagrama de flujo XBee recepción.....	60
3.7.Software para procesamiento de datos y la visualización.....	61
4.Proceso de caracterización.....	66
4.1.Caracterización con pesos.....	66
4.2.Caracterización con martillo.....	67
4.3.Caracterización con bolas.....	69

4.3.1.Descripción del hardware.....	70
4.3.2.Cálculos teóricos.....	71
4.3.3.Montaje adicional piezas.....	74
4.3.4.Problemática.....	78
5.Conflicto teórico.....	80
6.Pruebas y resultados.....	82
6.1.Objeto de estudio.....	82
6.2.Métodos.....	84
6.3.Resultados.....	84
6.4.Discusión.....	87
7.Conclusiones.....	89
8.Bibliografía.....	89

Agradecimientos

Agradecimientos a Joaquin del Rio por guiarme el proyecto y permitirme acceder al centro tecnológico. Especialmente muchos agradecimientos a Daniel Mihai Toma por ayudarme y resolverme infinidad de cuestiones sobre el proyecto.

I.Introducción y objetivo del proyecto

I.1.Introducción

Hoy en día en la industria de los zapatos deportivos se esta utilizando cada vez más tecnología y ingeniería para producir productos de alta calidad. En concreto en los zapatos de running o de skate la mayor importancia recae en gran parte en las suelas. Unas buenas suelas ayudan a prevenir daños en los talones e hacen el correr y saltar más comfortable. Algunos deportistas de élite dicen que una buena suela puede marcar una diferencia y ayudar a alcanzar la victoria. No obstante las grandes empresas como Nike, Adidas, Reebok, Asics, Etnies, etc no presentan datos numéricos de la calidad de la suela. Por ejemplo una característica que se puede cuantificar es la amortiguación producida por las suelas de zapato. A raíz de esto se ha estado buscando por estudios realizados y por los distintos sistemas que existen actualmente.

I.1.1.Resumen metodologías para la medición de propiedades atenuadoras de zapatos

Se ha encontrado que efectivamente existen sistemas y estudios que permiten hacer la medición de esta propiedad.

Resumiendo para explicar la metodología, se diferencian dos partes:

I.Generación de fuerzas en el zapato.

Las fuerzas pueden ser generadas mediante máquinas o por humanos



Figura 1: Fuerza generada por una máquina



Figura 2: Fuerza generada por un humano

2. Medición de las fuerzas que ocurren en el interior del zapato al aplicar una fuerza externa.

Esto es posible mediante sistemas de plantillas sensorizadas, plataformas dinamométricas o indirectamente a través de acelerómetros.



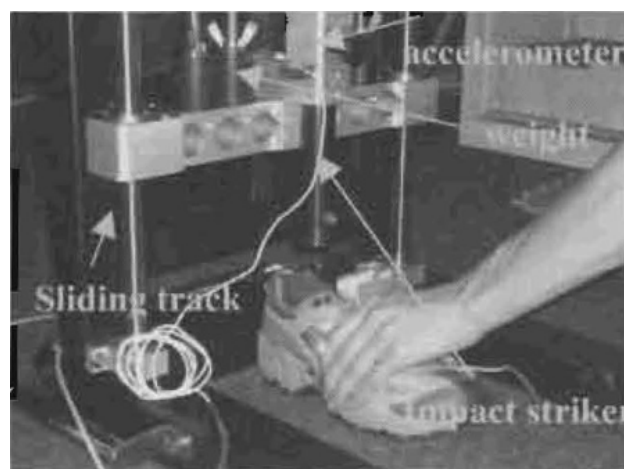
Figuras 3,4 y 5: Suela instrumentada, plataforma dinamométrica, análisis cinemático

1.1.2. Ejemplos y observaciones:

Un ejemplo para la medición de propiedades atenuadoras mediante la combinación de una máquina y un acelerómetro se puede encontrar en el estudio de "Chiu, Ht., Shiang, T.Y., & Lin, D.C. (2001)" [1] o "Hung Ta Chiu (2005)" [2].

Por otro lado un ejemplo utilizando fuerza humana y plantillas instrumentadas es el estudio de "Windle, C.M., Gregory, S.M., & Dixon, S.J. (1999)" [3] o "House CM, Waterwoth C, Allsopp AJ, Dixon SJ (2002)" [4].

Todos estudios tienen en común que la atenuación producida por la suela de zapato/ plantilla es obtenida indirectamente o mediante varios ensayos. Por ejemplo "Hung Ta Chiu" intenta encontrar la energía absorbida por plantillas en típicos zapatos de deportes mediante un ensayo de impacto. Utiliza una máquina de impacto sobre un zapato sin plantilla y luego sobre un zapato con plantilla. Mediante la comparación de la información dada por el acelerómetro en los dos ensayos, efectúa una conclusión sobre la energía absorbida.



Figuras 6: Máquina de impacto con acelerómetro usada sobre un zapato

Un método indirecto también se da lugar cuando se trata de medir la atenuación mediante fuerzas causadas por humanos y fuerzas medidas por plantillas instrumentadas/plataformas dinamométricas. Por ejemplo "Windle, C.M., Gregory, S.M., & Dixon, S.J. " en su estudio le colocan en las botas de un grupo de militares que realizan tareas en la superficie de un barco 4 tipos de plantillas diferentes y a un grupo no se les coloca ninguna plantilla. El estudio trata de determinar la absorción producida por las 4 diferentes plantillas. Las presiones que suceden en el interior de las botas de los militares son registradas con plantillas instrumentadas (debajo de las plantillas que se tratan de analizar). Finalmente también aquí las conclusiones son tomadas referenciándose a las presiones que ocurren cuando no hay ninguna plantilla.

1.2.Objetivo

Por ese motivo el objetivo del proyecto es crear un sistema compacto para medir la amortiguación producida por suelas de zapato/plantillas de manera más directa y únicamente a través de un ensayo. La idea es hacer un sistema portable de plantillas instrumentadas en el que una plantilla instrumentada se coloque en la parte inferior del zapato y la otra plantilla en el interior del zapato. Además un software específico que permita la interpretación de las presión. De esta manera se espera a la hora del impacto medir diferencias entre las dos plantillas.

El sistema podría ser usado para simplificar los ensayos utilizando una máquina de impacto ya que el acelerometro situado en la máquina ya no sería necesario. Eso ahorraría tiempo ya que acelerometros son difíciles de configurar y interpretar. Por otro lado si el sistema se usase con fuerzas producidas por humanos podría proporcionar resultados mucho más precisos y rápidos ya que solo un ensayo sería necesario.

2.Estado del arte

Actualmente las compañías de zapatillas que quieren medir la atenuación de sus suelas lo hacen siguiendo el estandar ASTM F1614. Resumiendo se trata de un procedimiento que deben seguir las compañías utilizando distintas maquinas y sistemas de medida para dar conclusiones coherentes sobre las propiedades de atenuación de sus zapatillas deportivas.

2.1.Estándar para la medición de las propiedades atenuadoras (ASTM F1614)

Se trata de un método de ensayo utilizado por los manufactures de calzado deportivo como herramienta para poner a prueba las características de atenuación de las suelas de sus calzados deportivos.

Este método esta diseñado para proporcionar la relación entre fuerza y desplazamiento en respuesta a esencialmente compresiones uniaxiales, que son parecidas a las fuerzas ejercidas al correr. Esas son de es hasta 2kN en tiempos entre 10 a 20 ms.

El método engloba tres diferentes procedimientos:

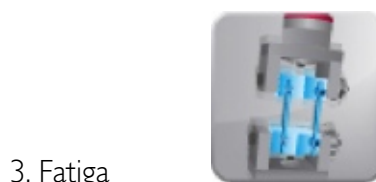
- 1.Procedimiento para maquinas que dejan caer peso
- 2.Procedimiento para maquinas controladas por fuerza de compresión
- 3.Procedimiento para maquinas controladas por desplazamiento de compresión

Nota: No se podía acceder a más información ya que en caso contrario se tendría que haber pagado.

2.2.Sistemas para la generación de fuerzas en los zapatos

2.2.1.Máquinas

Según el estándar ASTM F1614 se deben de utilizar maquinas que permitan como mínimo uno de los siguientes 3 ensayos para generar las fuerzas en los zapatos:



En el mercado existen varias máquinas que pueden realizar estos ensayos, un buen ejemplo que permite los 3 y por lo tanto cumple la norma es:

ElectroPuls Electrodynamic Test Instrument:



Figura 7:ElectroPuls Electrodynamic Test Instrument utilizado en una zapatilla de deporte

Relacionado con normas	ASTM F1614
Tipo de probeta:	Irregular Componente
Materials:	Plastics Ropa/Zapatos Caucho/Elastómeros Materiales biomédicos
Tipo de ensayo:	Compresión High-Cycle Fatigue Impact
Sector empresarial:	Biomédico/Médico/Servicios de salud Productos de consumo/industriales Subcontratación de ensayos

Tabla 1: Características básicas ElectroPuls Electrodynamic Test Instrument

2.2.2. Humanos

No obstante la norma ASTM F1614 no incluye ensayos de fuerzas realizados con personas. Existen varios estudios en los que se han hecho ensayos con personas obteniendo resultados coherentes. Por ejemplo: “Estudio baropodométrico de los valores de presión plantar en pies no patológicos” por “A. MARTÍNEZ-NOVA^a, R. SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ^a, J.C. CUEVAS-GARCÍA^a Y E. SÁNCHEZ-BARRADO^{a,b}”.

Realizar ensayos con personas tiene como ventaja que las fuerzas aplicadas son mucho más cercanas a la realidad del uso. En cambio al utilizar maquinas es solo una simulación de una fuerza parecida a la que la zapatilla va a ser sometida realmente.

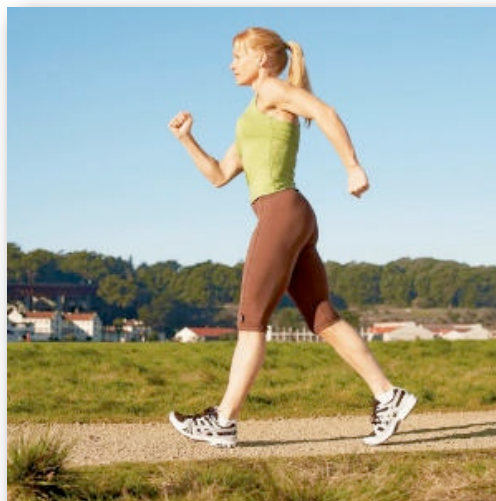
Cuando se realizan ensayos con humanos de diferencias básicamente 3 tipos:

1. Fuerzas producidas al correr



Figuras 8: Deportista corriendo

2. Fuerzas producidas al caminar



Figuras 9: Deportista caminando

3.Fuerzas producidas al saltar



Figuras 10: Deportista efectuando un salto

2.3. Medición de las fuerzas que ocurren en el interior del zapato al aplicar una fuerza externa.

Actualmente no existe ningún sistema compacto que permite medir directamente la amortiguación producida por las suelas de zapato directamente. No obstante se hacen las conclusiones sobre esta magnitud de manera indirecta, midiendo las presiones que ocurren en la suela del zapato o en la plantilla.

Para hacer esto existen básicamente tres sistemas:

- I. Sistema de plantillas instrumentadas
2. Plataformas dinamométricas
3. Acelerómetros

2.4.Sistema de plantillas instrumentadas

2.4.1.Definición:

“Los sistemas de plantillas instrumentadas están diseñadas para medir y analizar las presiones en la planta del pie en las condiciones en que éste se desenvuelve habitualmente, es decir, con calzado y en movimiento.”

2.4.2.Composición:

La estructura de los sistemas de plantillas instrumentadas suele ser el siguiente:

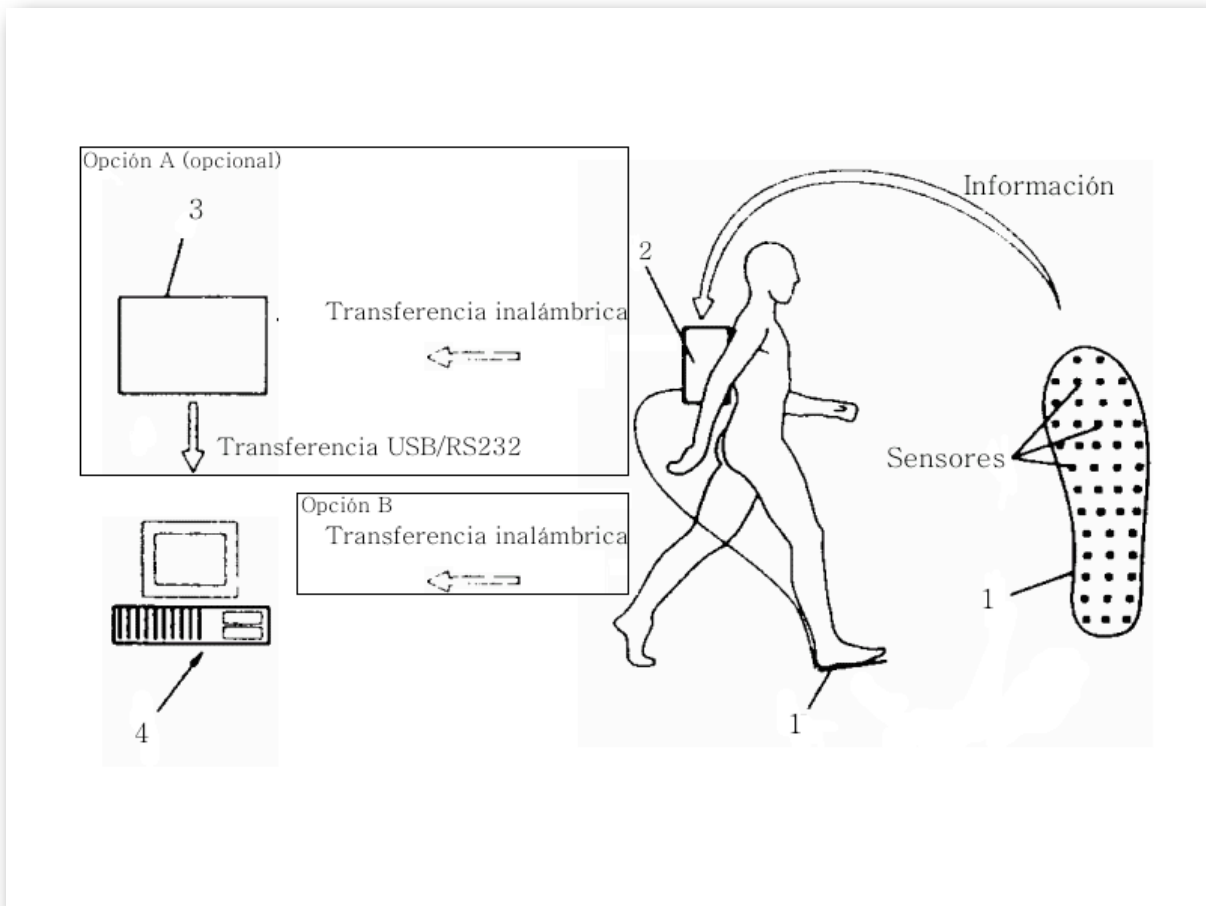


Figura 11: Esquema sistemas de plantillas instrumentadas

Donde:

1. Plantillas instrumentadas

Las plantillas instrumentadas captan la información del impacto a través de sensores de deformación. Normalmente suelen ser sensores piezoeléctricos ya que estos pueden ser de tamaño muy reducido y presentar gran precisión.

2.Módulo de acondicionamiento y envío inalámbrico de datos

Dado que la información que sale de los sensores piezoeléctricos no suele ser apropiada para ser procesada por el módulo de envío primero hay un módulo de acondicionamiento que corrige esta problemática.

Después de esto la información entra dentro del módulo de envío. Éste está formado por un microprocesador embebido en un sistema que permite la transferencia inalámbrica de información. El microprocesador convierte la señal eléctrica analógica en una señal digital y el resto del sistema efectúa el envío de los datos.

3.Módulo de recepción (opcional):

Cuando está presente el módulo de recepción de datos está formado por un microprocesador que recibe los datos y luego los envía al puerto serie o puerto USB del ordenador.

El módulo de recepción es opcional ya que algunos sistemas permiten hacer el envío de datos directamente al ordenador B.

4.Software de procesamiento de datos:

Finalmente la información que entra al ordenador de manera inalámbrica o por puerto aún no está preparada para que el usuario la pueda interpretar. Por ello un programa informático debe de procesar los datos y ilustrarlos de manera adecuada.

2.4.3. Sistemas de plantillas instrumentadas en el mercado

2.4.3.1. Pedar-X:

A nivel mundial, la compañía líder en vender sistemas de plantillas instrumentadas es Novel, con su modelo Pedar-X:



Figura 12: Pedar-X, sistema plantillas instrumentadas con módulo de envío

Información general:

El sistema consiste en dos plantillas instrumentadas, un modulo de transferencia de datos inalámbrico y un software específico.

Información específica:

Sensores:

Dependiendo del modelo, cada plantilla contiene 246 o 1024 sensores y puede medir en un rango de hasta 1200kPa con una resolución de 2.5 o 5 kPa.



Figura 13: Plantillas instrumentadas Pedar-X

Módulo de transmisión:

El modulo de transmisión es de 150x100x40mm, pesa 360g y se coloca en la cintura de la persona que lo esta utilizando.



Figura 14: Módulo de transmisión colocado en la cintura

La información registrada por los sensores es enviada al modulo de transmisión que puede operar vía bluetooth para enviar la información al ordenador o guardar la información en una memoria flash para posteriormente ser conectado al ordenador vía USB. La capacidad de la memoria flash es de 32MB y la frecuencia de medida es de 20000 muestras/s

Software:

Las plantillas vienen un con software que permite representar la información adquirida.

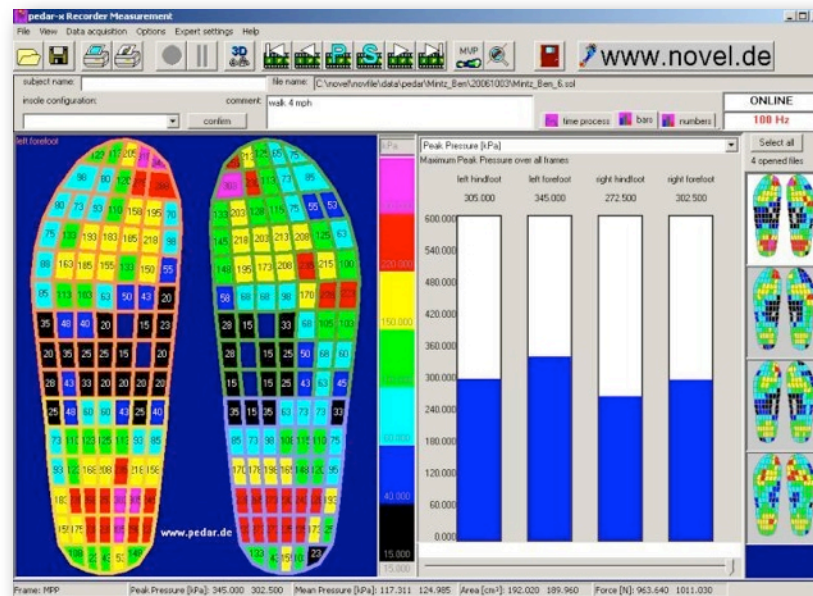


Figura 15: Software para las plantillas Pedar-X

Tabla características:

Technical data for pedar [®] -x	
dimensions (mm)	150x100x40
weight (g)	360
number of sensors (max.)	256/1024
measurement frequency	20,000 sensors/sec
storage type	32 MB internal flash
recording time	25 min at 100 Hz to flash memory
operating system	Windows XP Service Pack 2
power supply	NiMH battery, 4,5 h
computer interface	fibre optic/USB and Bluetooth [™]
sync option	fibre optic/TTL, in and out/wireless
telemetry	Bluetooth [™]
wireless remote ctr.	FM

Tabla 2: Características generales sistema Pedar-X

Technical data for pedar [®] -x insoles	
shoe size	22 to 49 (European), 3 widths
thickness (mm)	1.9 (min. 1)
number of sensors (max.)	85 - 99
pressure range (kPa)	15- 600 or 30-1200
hysteresis	<7 %
resolution (kPa)	2,5 or 5
offset temperature drift	<0.5
minimal bending radius	20 mm

Tabla 3: Características técnicas sistema de plantillas Pedar-X

Precio:

El precio del pack completo compuesto por 2 plantillas, el módulo de transferencia y el software es de 15,450.000 Euros.

2.4.3.2. Biofoot

A nivel nacional el Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) también tiene un sistema de plantillas instrumentadas que vende de manera comercial llamado Biofoot:



Figura 16: Foto portada catálogo sistema de plantillas Biofoot

Información general:



Figura 17. Pack Biofoot

En este caso el pack proporcionado incluye cinco pares de plantillas instrumentadas de entre las tallas y modelos disponibles. Dos amplificadores, un módulo transmisor, una tarjeta de recepción y el software específico.

Información específica:

Sensores:



Figura 18: Plantillas instrumentadas Biofoot

Cada plantilla dispone de hasta 64 puntos de medida distribuidos de forma tal que la densidad sea mayor en las zonas de mayor interés; de esta forma se consigue una medida más precisa de la distribución de presiones. Son plantillas reversibles, lo que permite su uso en ambos pies.

La vida media de una plantilla se sitúa, aproximadamente, en 3.000 pasos, variando de forma significativa en función de las sollicitaciones mecánicas a las que se vea sometida; por ello, las plantillas son utilizables durante un alto número de mediciones. Pueden seguir utilizándose aun cuando se haya inutilizado algún sensor.

Cada plantilla se suministra con su fichero de calibración, el cual debe ser instalado antes de medir por primera vez con una plantilla nueva.

Las plantillas permiten medir en un rango de hasta 1200kPa con una resolución de medida de 0.1 kPa.

Amplificador:



Figura 19: Amplificador Biofoot

Para su sujeción a la pierna del sujeto de ensayo, se utiliza una banda elástica ajustable. Su función es amplificar las señales de los sensores de la plantilla y enviar estas señales al ordenador, así como detectar el modelo de plantilla utilizada.

Modulo transmisor:



Figura 20: Módulo transmisor Biofoot

Se colocará en el sujeto de ensayo, utilizando para su sujeción a la cintura un cinturón de longitud regulable. El módulo envía los datos adquiridos al PC en el que se encuentra instalado el Software Biofoot/IBV, para su posterior tratamiento y análisis. Esta transmisión se realiza mediante tecnología WiFi.

Software:

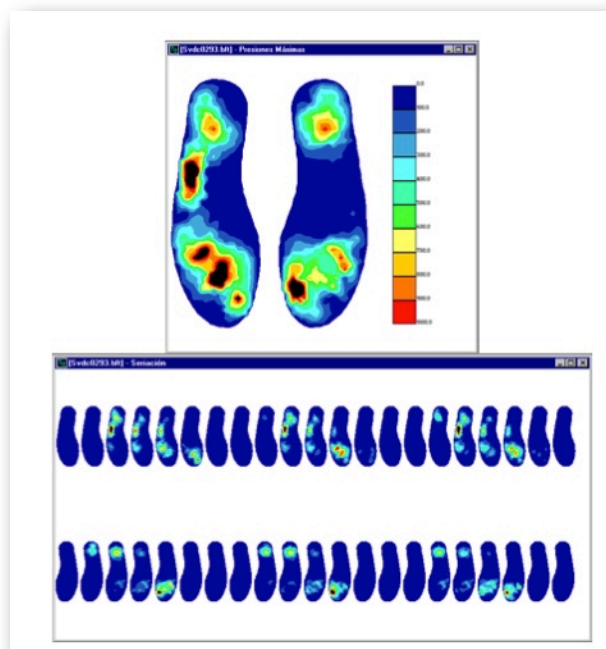


Figura 21. Software Biofoot

El software permite:

- Mapa numérico de presiones y presiones máximas,
- Gráfica de fuerza total/tiempo, visible siempre en la pantalla principal para ser usada como método de selección para un instante de tiempo,
- Mapa tridimensional con escala de colores o grises,

- Gráfica superficie de apoyo/tiempo,
- Mapa de isobaras,
- Gráfica de presiones/tiempo,
- Posición y trayectoria del baricentro,
- Seriación con representación simultánea de mapas de presiones durante todo el apoyo,
- Monitorización en tiempo real del mapa de presiones,
- Tabla de parámetros calculados por zonas (definibles por el usuario).

Tabla características:

Rango de medida	0 – 1200 kPa
Rango de Calibración	0 – 500 kPa
Resolución de medida	0.1 kPa
Incertidumbre de medida	10% del fondo de escala calibrado
Calibración del equipo	Calibrado en origen (Se recomienda recalibración cada 2 años)

Tabla 4: Características suelas instrumentadas Biofoot

Precio:

No indicado

2.5. Plataformas dinamométricas

Las plataformas dinamométricas también sirven para medir las presiones que sufre el pie en actividades en movimiento o parado. Si se usa la plataforma con calzado se puede observar que presiones recaen en la suela del zapato. No obstante no permite ver que sucede dentro de la planta del pie.

Estas plataformas son la opción más utilizada por podólogos para diagnosticar anomalías en los pies y en la pisada.

Las plataformas normalmente están hechas con sensores resistivos como galgas extensionométricas. Existen de multitud de tamaños, desde modelos pequeños que solo abarcan el tamaño de un pie hasta modelos grandes que abarcan superficie para varias personas.

Ejemplos en el mercado:

La compañía Novel también vende plataformas dinamométricas, su modelo es el Emed.



Figura 22:Plataforma dinamométrica Emed

A nivel nacional el Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) también tiene una plataforma llamada Dinascan.



Figura 23: Niño utilizando la plataforma dinamométrica Dinascan

2.6. Acelerómetros

Se denomina acelerómetro a cualquier instrumento destinado a medir aceleraciones.

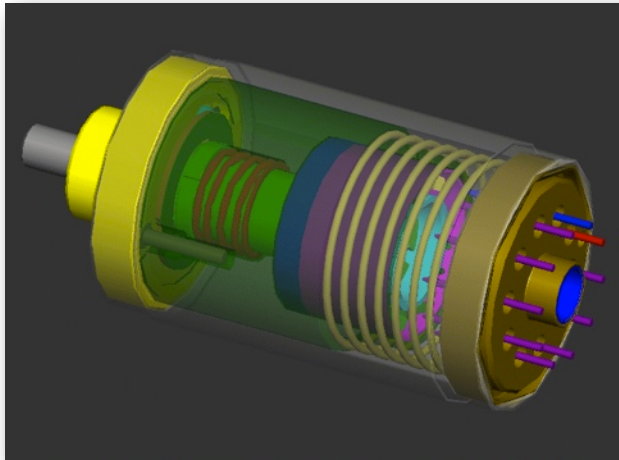


Figura 24: Acelerómetro

Cuando se hace uso de acelerómetros para la medición de fuerzas normalmente se usa en combinación con una máquina de impacto. La idea es que el acelerómetro se coloca en la componente que efectúa el desplazamiento para dar lugar al impacto. Después de los ensayos los datos del acelerómetro son interpretados para hacer deducciones sobre las fuerzas que han ocurrido en el interior del zapato.



Figura 25: Máquina de impacto vertical

3.Desarrollo del sistema de plantillas instrumentadas

Después de analizar los distintos métodos para medir las presiones en zapatos se decidió que un sistema de plantillas instrumentadas era la mejor opción para las motivaciones y circunstancias del proyecto.

Dado que comprar un sistema de plantillas instrumentadas es muy caro se ha desarrollado un propio sistema gastando menos de 50euros.

3.1.Visión global



Figura 26: Sistema de plantillas instrumentadas en uso

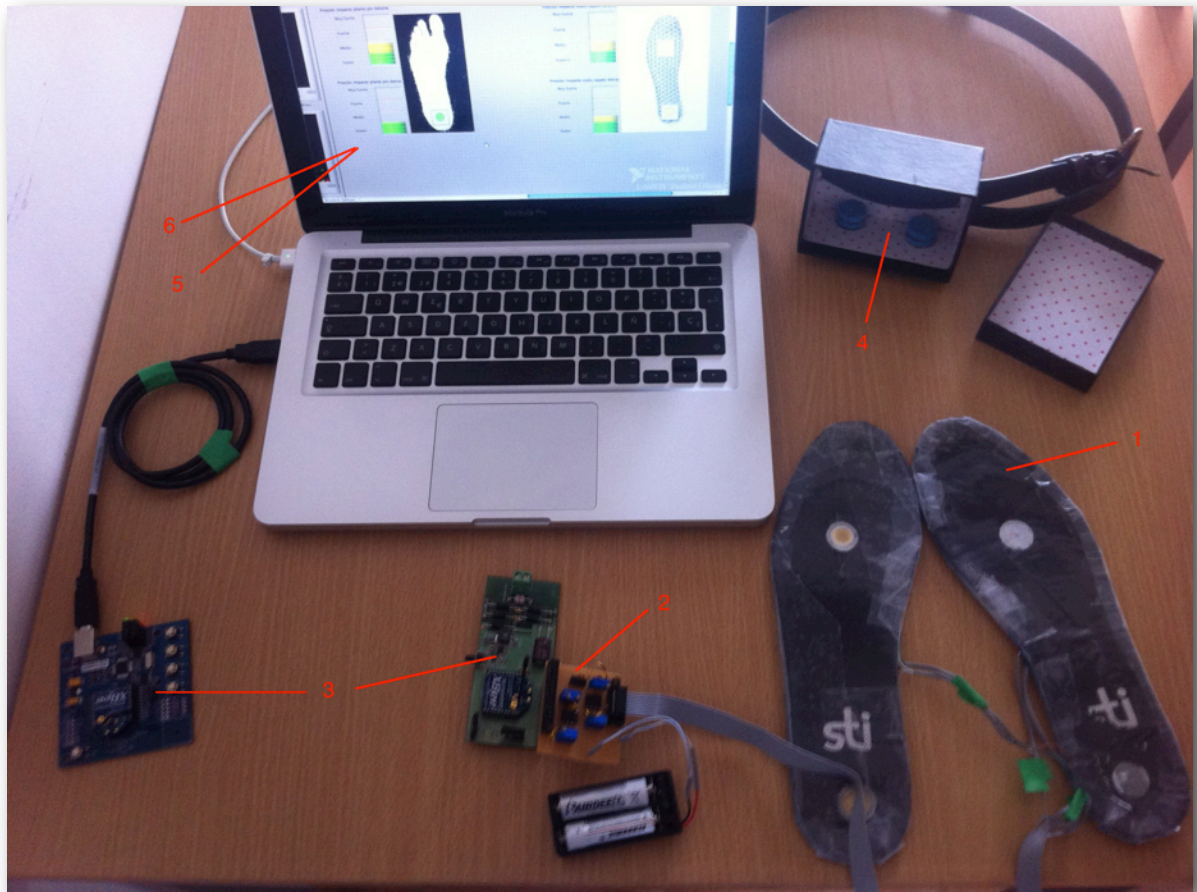


Figura 27: Visión global del sistema

El sistema se puede dividir en 5 bloques funcionales:

- I. Plantillas instrumentadas
2. Placa de acondicionamiento
3. Módulo de envío y recepción
4. Accesorios para el uso
5. Software para la programación de los módulos de envío y recepción
6. Software para el procesado de datos y visualización

3.1.1. Características técnicas sistema:

Dimensiones caja para el módulo de envío	10,7cm x 10cm x 5,5cm
Peso con el módulo de envío, sin pilas (g)	183
Número de sensores	4
Frecuencia de muestreo	146us
Tipo de almacenamiento	60K de memoria flash interna
Número de muestras adquiridas	1000 (250 muestras por cada canal)
Sistema operativo	Windows XP/Mac
Alimentación	3V , dos baterías AA
Conexión módulo recepción y ordenador	USB (Virtual USB port)
Telemetría	FM
Software	Labview

Tabla 5: Características técnicas del sistema

3.1.2. Características técnicas suelas

Talla de zapato	41 (EU) 8 (US)
Grosor (cm)	0,4
Número de sensores (por suela)	4
Radio sensor (cm)	0,5

Tabla 6: Características técnicas suelas

3.2.Plantillas instrumentadas

3.2.1Función del bloque:

Las plantillas instrumentadas captan la información sobre el impacto a través de sensores piezoeléctricos y la transmiten mediante un cable plano.

3.2.2.Descripción del hardware:



Figura 28. Plantillas instrumentadas

Donde:

1.Plantillas

2.Sensores piezoeléctricos

3.Cable plano

3.2.1. Plantillas:

Para poder colocar los sensores piezoeléctricos en el interior del zapato se han cogido unas plantillas normales y se han hecho dos agujeros



Figura 29: Plantilla con agujeros

Para realizar los agujeros de la manera más exacta posible se ha utilizado una troqueladora.



Figura 30: Troqueladora con plantilla

3.2.2. Sensores piezoeléctricos

Los sensores piezoeléctricos son dispositivos que utilizan el efecto piezoeléctrico para medir presión, aceleración, tensión o fuerza; transformando las lecturas en señales eléctricas.

En el caso del proyecto presente se han utilizado sensores con la finalidad de medir presión.

Breve resumen efecto piezoeléctrico:

“La piezoelectricidad es un fenómeno presentado por determinados cristales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también se presenta a la inversa, esto es, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible: al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma.”

Por ejemplo:

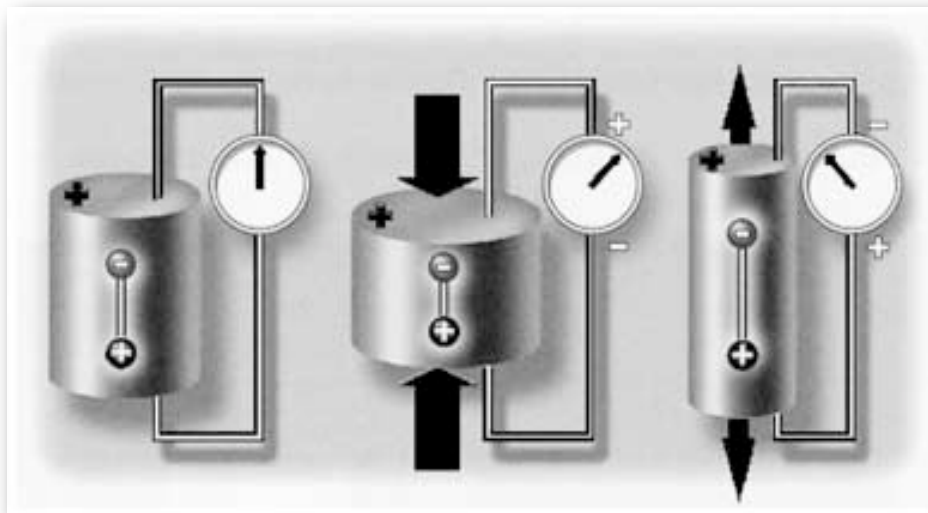


Figura 31: Efecto piezoeléctrico

En la primera parte de la imagen aparece el material en reposo, no hay tensión. En la parte central de la imagen aparece el material comprimido dada una fuerza, el resultado es una tensión positiva. En la última imagen la fuerza es de tracción y se puede divisar una tensión negativa a la salida.

El modelo del sensor piezoeléctrico que se ha usado es el siguiente:

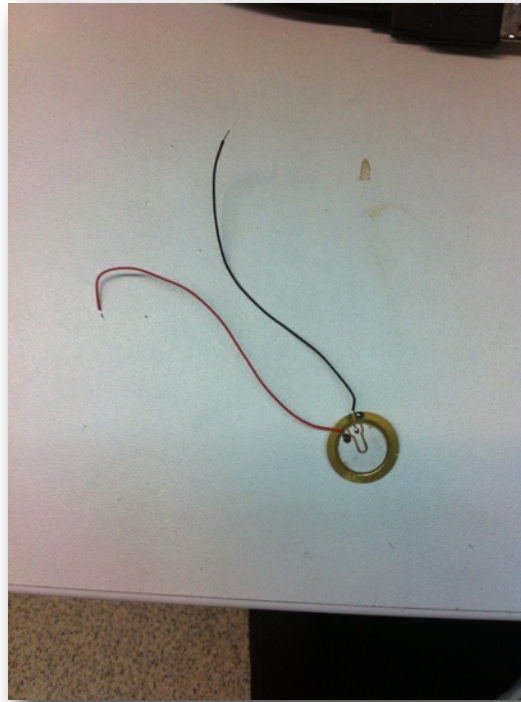


Figura 32: Sensor piezoeléctrico Murata (7BB-35-3L0)

Se trata de un sensor piezoeléctrico del tipo PZT en forma de disco con un diámetro de 1,5cm de la marca Murata (7BB-35-3L0).

Razonamientos de la elección:

Antes de fabricar las plantillas instrumentadas se estuvo indagando sobre cual son los mejores sensores a utilizar. Tras varios análisis de plantillas instrumentadas se llegó a la conclusión que los sensores piezoeléctricos eran los más usados. Esto es así dado su reducido coste y gran sensibilidad que le permite mostrar hasta los cambios más pequeños.

No obstante tal y como se puede ver en la imagen X a estos sensores se les ha efectuado una pequeña modificación:

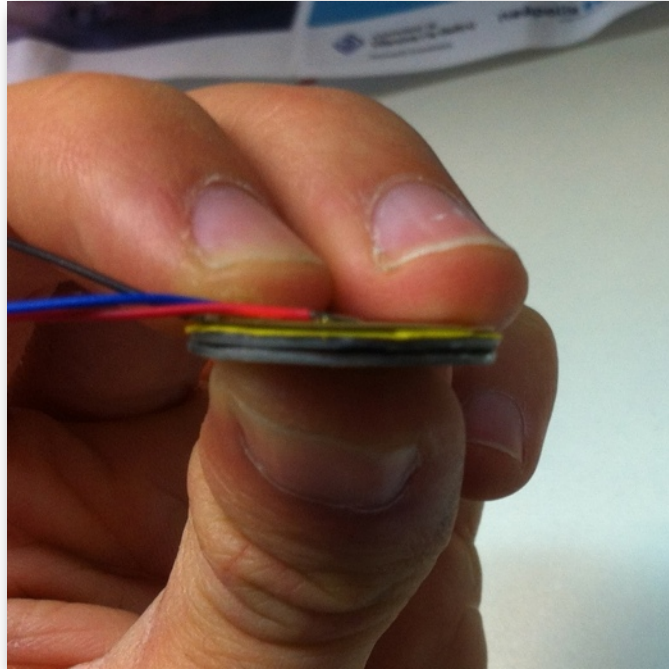


Figura 33: Montaje final sensor piezoeléctrico vista de perfil

Motivo:

El motivo por el cual se ha efectuado este pequeño montaje adicional es por el tema de la caracterización de los sensores. Se ha escogido un método de caracterización y se ha realizado la modificación para poder ser consecuente con esta caracterización.

3.2.2.1. Caracterización de los sensores piezoeléctricos

Los sensores dan un voltaje si aplicas una fuerza sobre ellos por lo tanto es imprescindible saber la relación entre tensión y fuerza. Esta característica los fabricantes no suelen darla. En el caso del sensor utilizado la información no esta presente en el datasheet. Se contactó con Murata vía e-mail preguntando sobre esta característica, lamentablemente ellos nos indicaron que no la tenían. Por lo tanto se tuvo que invertir un tiempo considerable en buscar maneras de caracterizar este sensor. Se intentaron en total 4 diferentes maneras de caracterizar el sensor hasta llegar a la definitiva (Restantes 3 explicadas en el apartado 4, proceso de caracterización). Finalmente se hizo la caracterización mediante una pistola de aire comprimido. Este método se nos fue recomendado por el ingeniero del instituto de biomecánica de Valencia (IBV) que diseño las plantillas instrumentadas que tiene el IBV en el mercado. La idea es colocar un sensor piezoeléctrico en un circuito cerrado con la pistola de aire comprimido. Al apretar el gatillo la presión ejercida sobre el sensor será exactamente la presión del manómetro. En esta situación toda la superficie del piezo es presionada tal y como sería el caso al ser sometido a una pisada dentro de las plantillas.



Figura 34: Sistema para caracterizar el sensor piezoeléctrico

Un ejemplo:

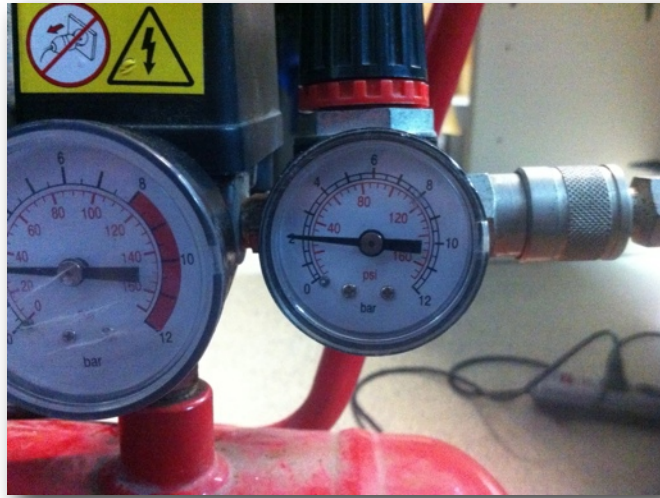


Figura 35: Manómetro del compresor

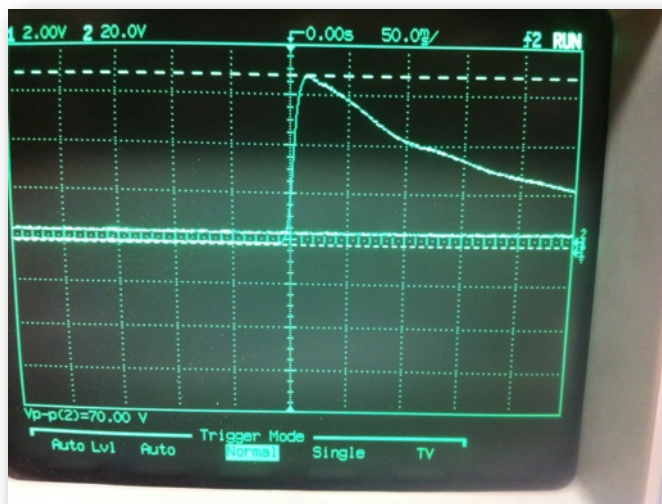


Figura 36: Tensión de salida del sensor piezoeléctrico

Resultados:

Después de varios ensayos a diferentes presiones se llegó a la conclusión que la relación entre presión aplicada y tensión de salida del sensor es de $2857 \frac{Pa}{V}$

3.2.2.2. Montaje adicional piezos

En la caracterización anterior el sensor piezoeléctrico se deforma libremente por su parte inferior. Si se usasen los sensores piezoeléctricos directamente en las plantillas, dado que aparece una presión tanto por la parte superior como por la parte inferior, la deformación del piezo sería diferente.

Por ello se ha ingeniado una manera en la que el piezo siempre se pueda deformar libremente por la parte inferior:

Esquema:

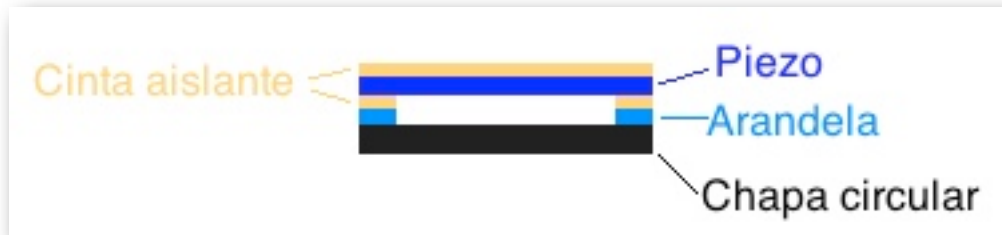


Figura 37. Esquema montaje final del piezo

Descripción hardware:

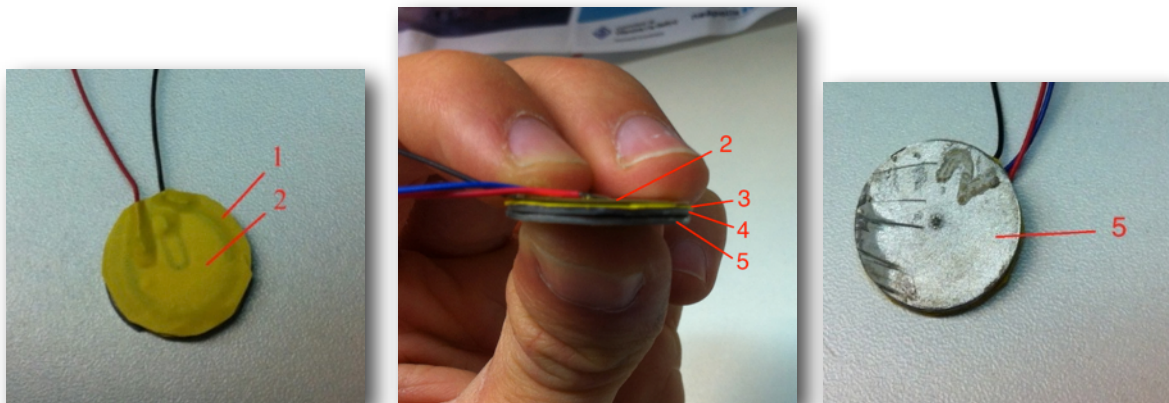


Figura 38 Montaje final sensor piezoeléctrico vista desde arriba, perfil y abajo

Donde:

1. Cinta aislante,

2. Sensor piezoeléctrico

3. Cinta aislante

4. Arandela

5. Chapa metálica

Los sensores piezoeléctricos al entrar en contacto con otros materiales pueden cambiar ligeramente su comportamiento eléctrico, para evitar esto se ha colocado cinta aislante.

3.2.3. Cable plano

Dado que los cables de los sensores no son muy robustos se han conectado a un cable plano. Este cable plano es más resistente y añade la ventaja que evita enredos entre los mismos cables de los sensores.



Figura 39: Cable plano

3.3.Placa de acondicionamiento

3.3.1.Función del bloque:

Dado que la señal que sale de los sensores no es apropiada para entrar directamente en el módulo de envío se ha diseñado y construido una placa de acondicionamiento.

3.3.2.Descripción del hardware:

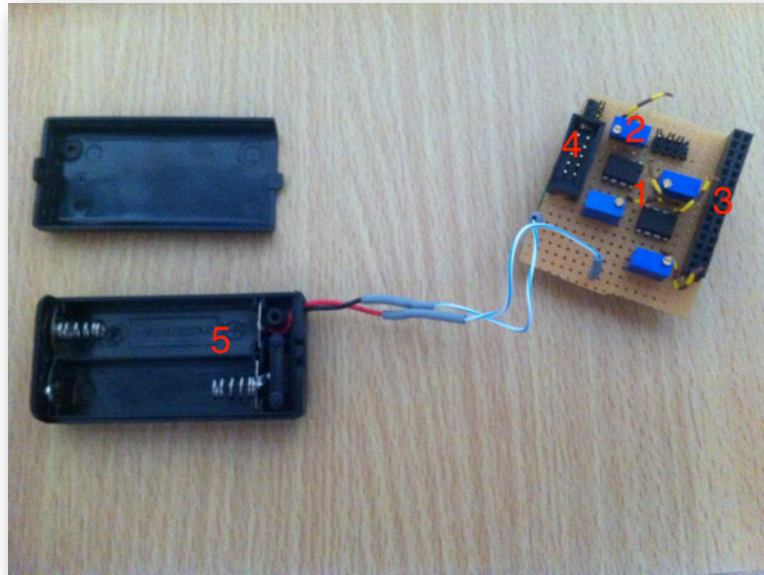


Figura 40. Placa acondicionamiento, visión superior

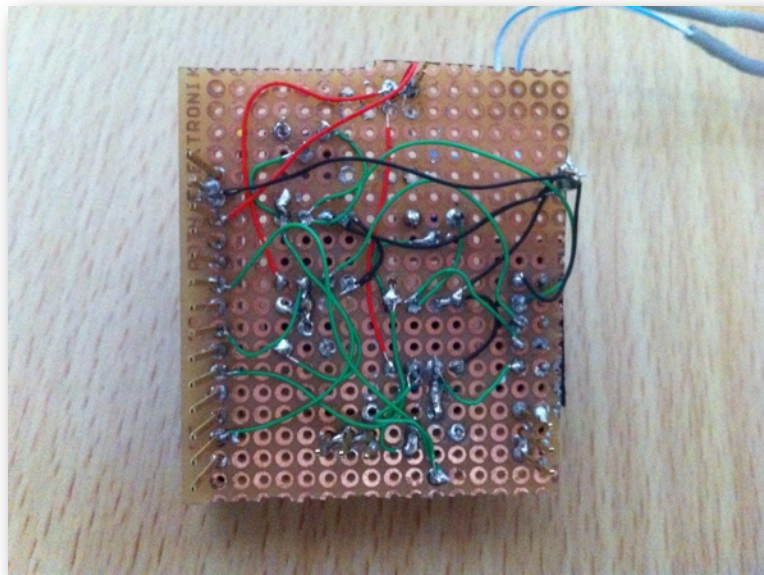


Figura 41. Placa acondicionamiento, visión inferior

Donde:

1. Amplificadores operacionales LM358N x2
2. Potenciómetros 1KOHM x4,
3. Conexión al micro
4. Conector para cable plano
5. Carcasa para 2 baterías AA

Explicaciones adicionales:

La tensión que sale de los sensores piezoeléctricos en ocasiones supera los 10V. Esto es un problema ya que si el microprocesador recibe una entrada superior a 3,4 voltios se puede romper. Por otro lado si se introduce directamente los sensores al micro aparece el efecto de carga. Dada esta problemática se ha optado por añadir una placa de acondicionamiento con el siguiente circuito.

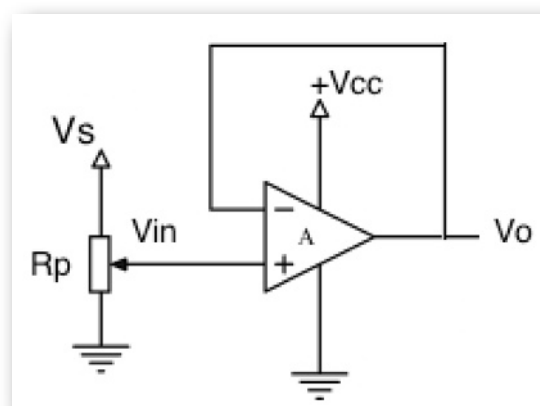


Figura 42. Circuito montado en la placa de topas

Dado que la entrada negativa del amplificador operacional esta conectado con la salida se puede decir que el circuito esta en lazo cerrado o realimentado. Cuando esto sucede se puede hablar del principio de cortocircuito virtual. Según este principio tanto la entrada negativa como la positiva tendrán la misma tensión.

Por lo tanto $V_{in} = V_o$

La entrada del sensor V_s es atenuada mediante un simple potenciómetro. Se puede variar el valor de V_{in} como máximo al valor de V_s y como mínimo a 0.

Por otro lado el circuito a la salida del amplificador operacional tiene una impedancia de salida muy pequeña de este modo la impedancia de entrada al micro también es pequeña. Así se consigue reducir al mínimo el fenómeno de efecto de carga.

3.4. Módulos de recepción y de envío

3.4.1. Función del bloque

La información recogida por los sensores necesita ser procesada por un ordenador. No obstante hacer una conexión directa entre sensores/placa de acondicionamiento y ordenador presenta varios inconvenientes. Entre ellos el hecho de que las plantillas tienen una finalidad de uso en movimiento y los cables largos pueden romperse con más facilidad e pueden producirse enredos molestos. Por ello se ha optado por hacer la conexión de los sensores/placa de acondicionamiento a un módulo de envío de datos muy cercano al cuerpo que envía los datos recogidos a un ordenador de manera inalámbrica. Luego al ordenador se ha conectado un módulo de recepción que recibe los datos y los envía por puerto serie al ordenador.

3.4.2. Módulo de envío

3.4.2.1. Función del módulo:

El módulo de envío recibe la información de los sensores a través de la placa de acondicionamiento y la envía al módulo de recepción.

3.4.2.2. Descripción del hardware:

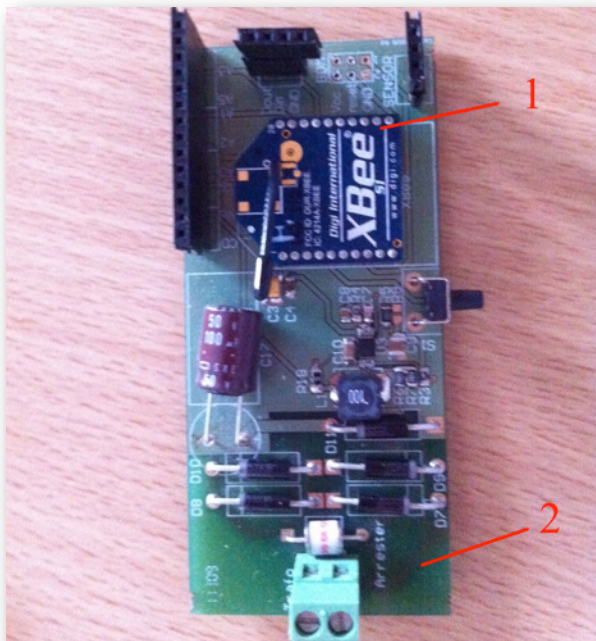


Figura 43. Módulo de envío

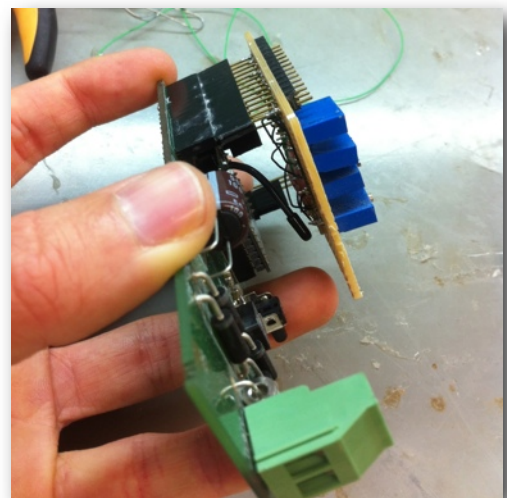


Figura 44 Placa de acondicionamiento montada encima del módulo de envío

Donde:

1. Módulo XBee:



Figura 45: Módulo XBee SI

El módulo de envío esta compuesto por un módulo XBee SI 802.15.4 OEM RF , que es el responsable de llevar a cabo la conversión los datos analógicos, que provienen de la placa de acondicionamiento, a digital y su envío de manera inalámbrica.

Información adicional:

Dimensiones:

Las dimensiones y la ubicación de los pines son los siguientes:

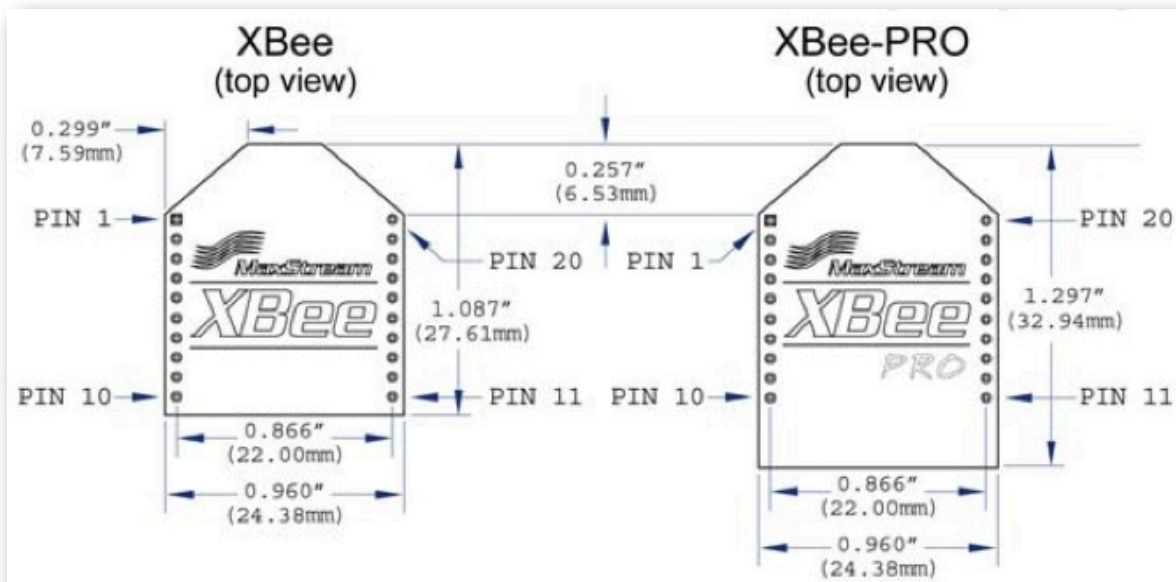


Figura 46: Dimensiones XBee visión superior y ubicación de los pines.

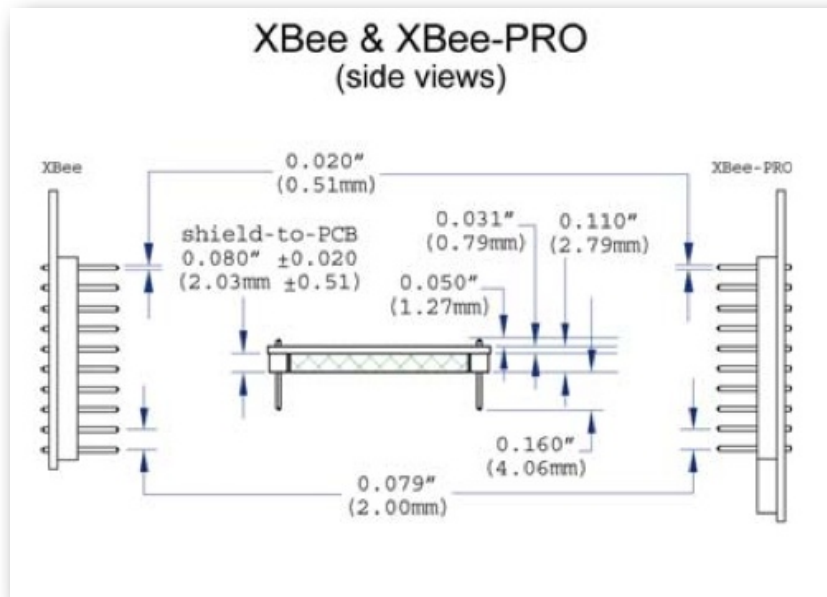


Figura 47: Dimensiones Xbee vista de perfil

Funciones pines:

La función de cada pin está resumida en la siguiente tabla:

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DO8*	Output	Digital Output 8
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI	Output	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator
7	PWM1	Output	PWM Output 1
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ / DI8	Input	Pin Sleep Control Line or Digital Input 8
10	GND	-	Ground
11	AD4 / DIO4	Either	Analog Input 4 or Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator
14	VREF	Input	Voltage Reference for A/D Inputs
15	Associate / AD5 / DIO5	Either	Associated Indicator, Analog Input 5 or Digital I/O 5
16	RTS / AD6 / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Analog Input 6 or Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0	Either	Analog Input 0 or Digital I/O 0

Tabla 7: Resumen funciones de cada pin del XBee

Para el proyecto presente se usan los pines 17-20 para introducir la señal de los sensores, el pin 1 para introducir la alimentación y el pin 10 para la tierra. A estos pines se accede mediante la placa de conexiones (Explicación apartado 2)

Resumen de las características generales:

Specification	XBee	XBee-PRO
Performance		
Indoor/Urban Range	up to 100 ft. (30 m)	Up to 300' (100 m)
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 300 ft. (100 m)	Up to 1 mile (1500 m)
Transmit Power Output (software selectable)	1mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm) conducted, 100 mW (20 dBm) EIRP*
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-92 dBm (1% packet error rate)	-100 dBm (1% packet error rate)
Power Requirements		
Supply Voltage	2.8 – 3.4 V	2.8 – 3.4 V
Transmit Current (typical)	45mA (@ 3.3 V)	If PL=0 (10dBm): 137mA(@3.3V), 139mA(@3.0V) PL=1 (12dBm): 155mA (@3.3V), 153mA(@3.0V) PL=2 (14dBm): 170mA (@3.3V), 171mA(@3.0V) PL=3 (16dBm): 188mA (@3.3V), 195mA(@3.0V) PL=4 (18dBm): 215mA (@3.3V), 227mA(@3.0V)
Idle / Receive Current (typical)	50mA (@ 3.3 V)	55mA (@ 3.3 V)
Power-down Current	< 10 μ A	< 10 μ A
General		
Operating Frequency	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector
Networking & Security		
Supported Network Topologies	Point-to-point, Point-to-multipoint & Peer-to-peer	
Number of Channels (software selectable)	16 Direct Sequence Channels	12 Direct Sequence Channels
Addressing Options	PAN ID, Channel and Addresses	PAN ID, Channel and Addresses
Agency Approvals		
United States (FCC Part 15.247)	OUR-XBEE	OUR-XBEEPRO
Industry Canada (IC)	4214A XBEE	4214A XBEEPRO
Europe (CE)	ETSI	ETSI (Max. 10 dBm transmit power output)*
Japan	n/a	005NYCA0378 (Max. 10 dBm transmit power output)**

Tabla 8: Resumen características generales XBee

En las especificaciones pone que la alimentación debe ser entre 2-8 a 3.4V, por lo tanto se ha alimentado el micro con dos baterías del tipo AA proporcionando una tensión de entrada al micro de 3.2V. La velocidad de envío utilizada ha sido la máxima posible de 250bps.

Microprocesador:

El microprocesador que lleva integrado es el "MC9S08GB60" de "Freescale".

Resumiendo las características más importantes del micro son:

Device	FLASH	RAM	TPM	I/O	Packages
MC9S08GB60	60K	4K	One 3-channel and one 5-channel, 16-bit timer	56	64 LQFP

Tabla 9: Características específicas MC9S08GB60

El número de bits del convertidor analógico a digital es 10

2. Placa para conexión al XBee:

La placa sobre la cual está conectado el módulo XBee sirve para poder interconectar la salida de la placa de adquisición con los pines de entrada/salida del XBEE.

Además en estas interconexiones se han añadido diodos zener que limitan la tensión si esta supera los 3 voltios. Esto es indispensable ya que a pesar de que el circuito de acondicionamiento ya reduce la tensión a unos niveles admisibles, siempre puede haber una sobre tensión y si esto sucediese el módulo XBee podría romperse.

3.4.3.Módulo de recepción

3.4.2.31.Función del módulo:

El módulo de recepción de datos tiene la función de recibir los datos emitidos de manera inalámbrica por el módulo de envío y enviarlos al ordenador por vía RS232.

3.4.3.2.Descripción del hardware:

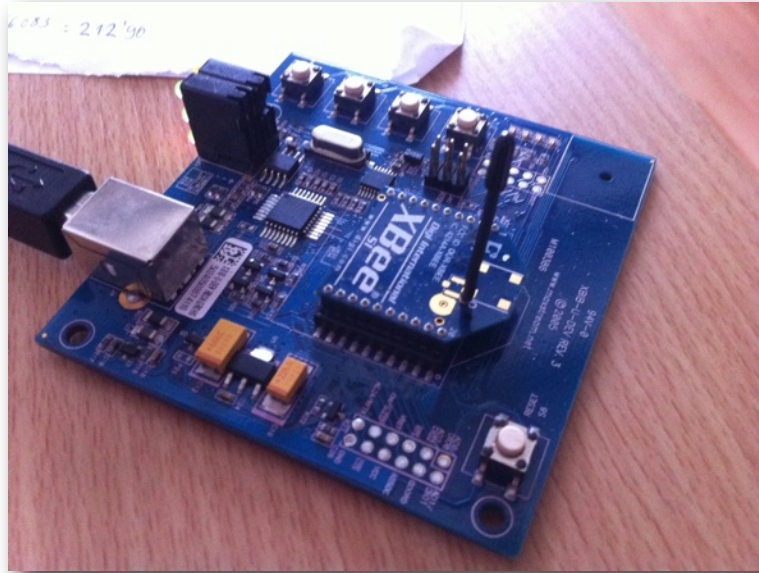


Figura 48. Módulo de recepción

Donde:

1.XBee

Se trata de un módulo idéntico al anterior. En este caso es el responsable de recibir los datos de manera inalámbrica y efectuar el envío hacia el puerto serie.

2.Placa para la conexión al XBee

Esta placa permite las mismas funciones que la placa anterior además de tener un puerto de comunicación serie por el cual salen los datos enviados por el XBee.

Las otras funciones que desempeña cada parte de la placa están recogidas en la siguiente imagen:

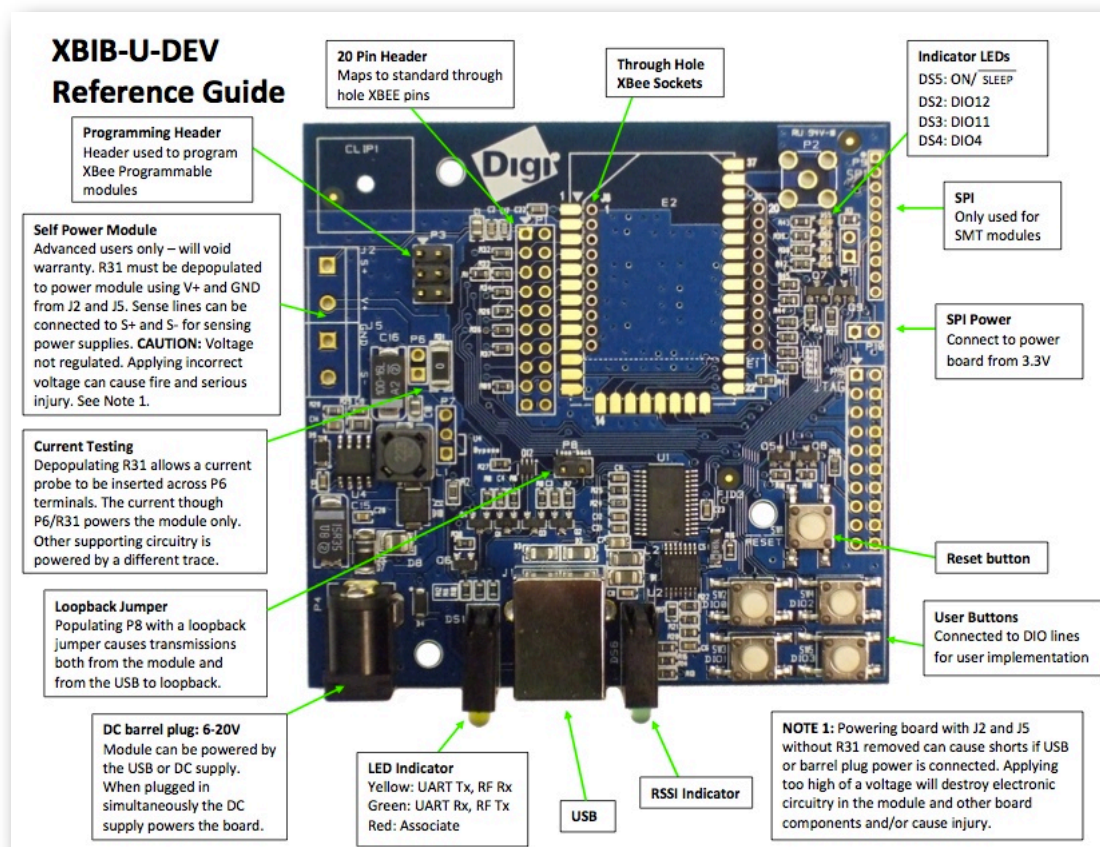


Figura 49: Funciones de la placa Digi para la conexión del XBee

3.5. Accesorios para el uso

Al acabar todas las piezas esenciales del proyecto se vio que aun faltaban 2 elementos básicos para facilitar el uso de todo el sistema.

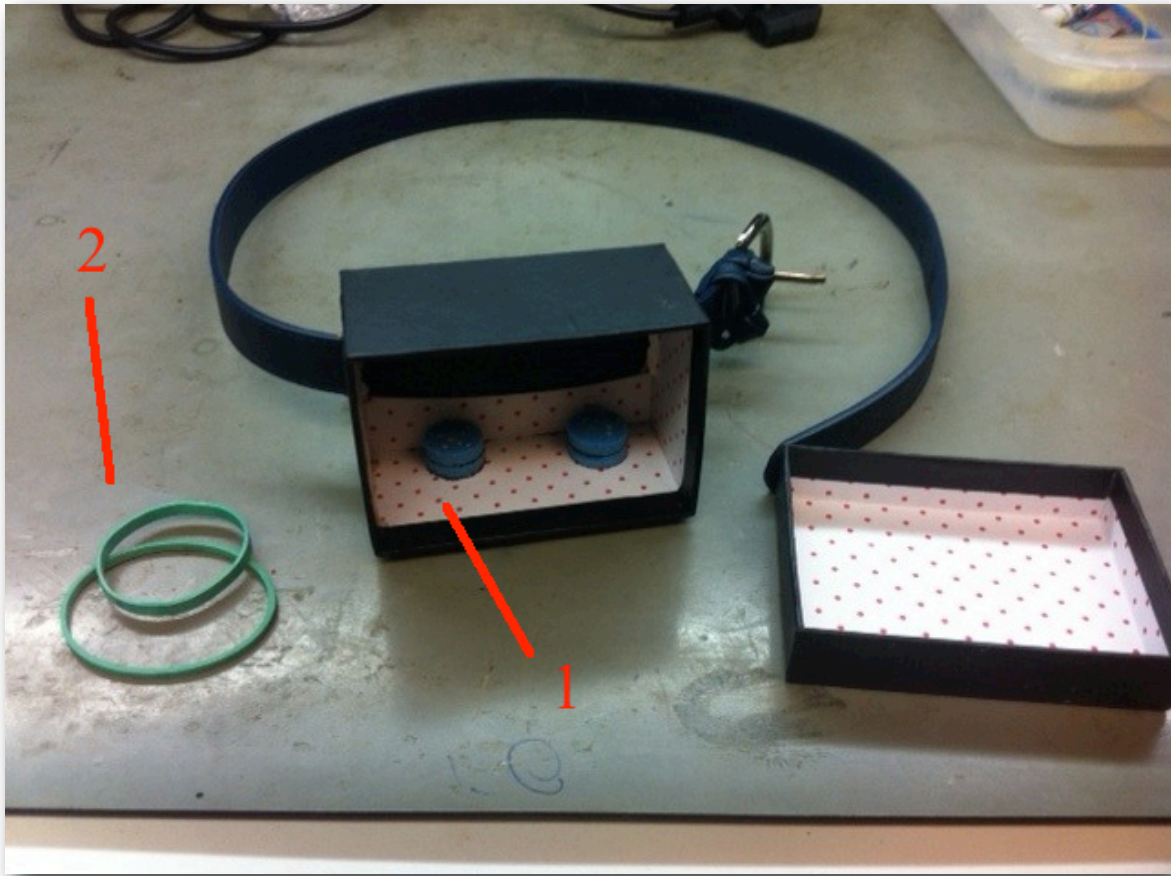


Figura 50: Accesorios para el uso

Donde:

I. Sistema de transporte para el circuito de acondicionamiento y el módulo de envío

Dado que es necesario transportar la placa de acondicionamiento y el módulo de envío cerca del cuerpo se ha optado por introducir estos dos elementos en una simple caja que esta fijada en un cinturón.

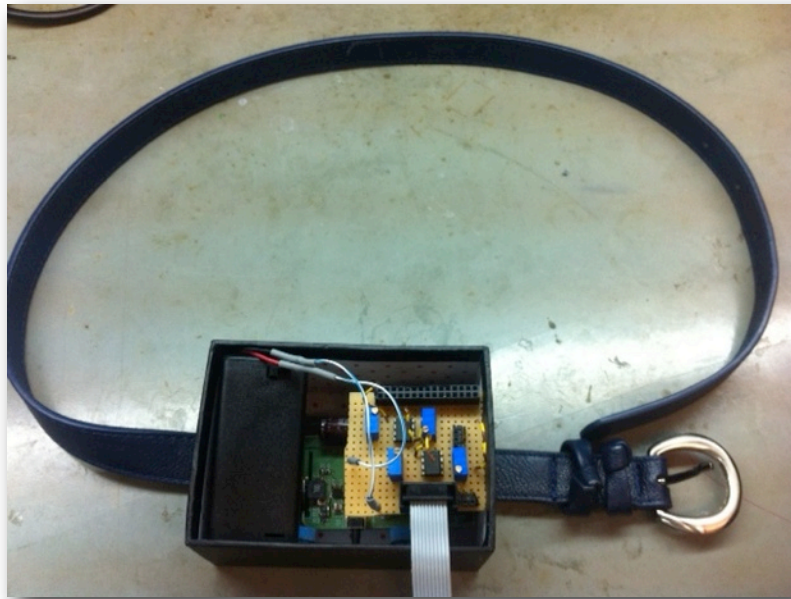


Figura 51: Caja para la placa de acondicionamiento y el módulo de envío destapada

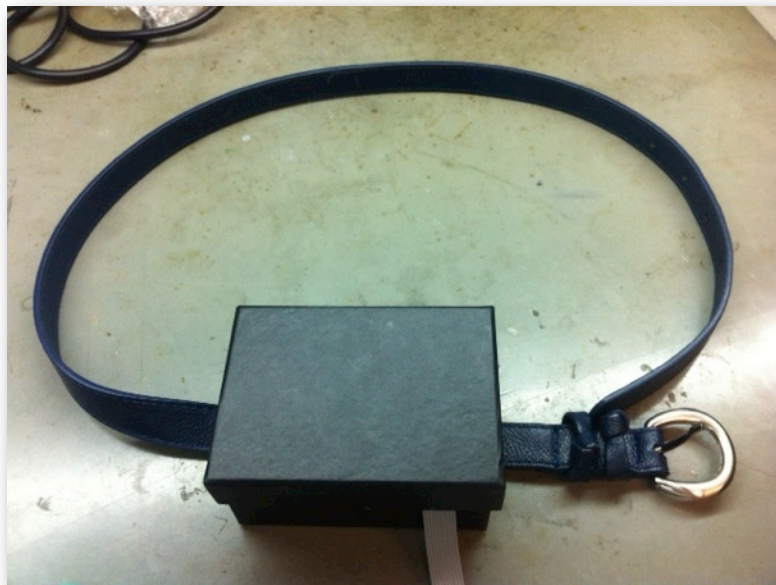


Figura 52: Caja para la placa de acondicionamiento y el módulo de envío cerrada

Dimensiones de la caja:

10,7cm x 10cm x 5,5cm

3. Gomas para mantener la caja cerrada y para sostener la plantilla inferior



Figura 53:Goma que asegura que la caja de transporte no se abra



Figura 54:Goma para mantener la plantilla colocada en la suela del zapato

3.6. Software para la programación de los módulos de envío y recepción

Los módulos XBEE requieren ser programados de manera adecuada para que cumplan las funciones esperadas.

El software usado para programar ha sido Codewarrior de Freescale. Se trata de un entorno de desarrollo integrado (IDE) basado en Eclipse que permite programar en C++/C.



Figura 55. Ilustración que aparece al encender CodeWarrior

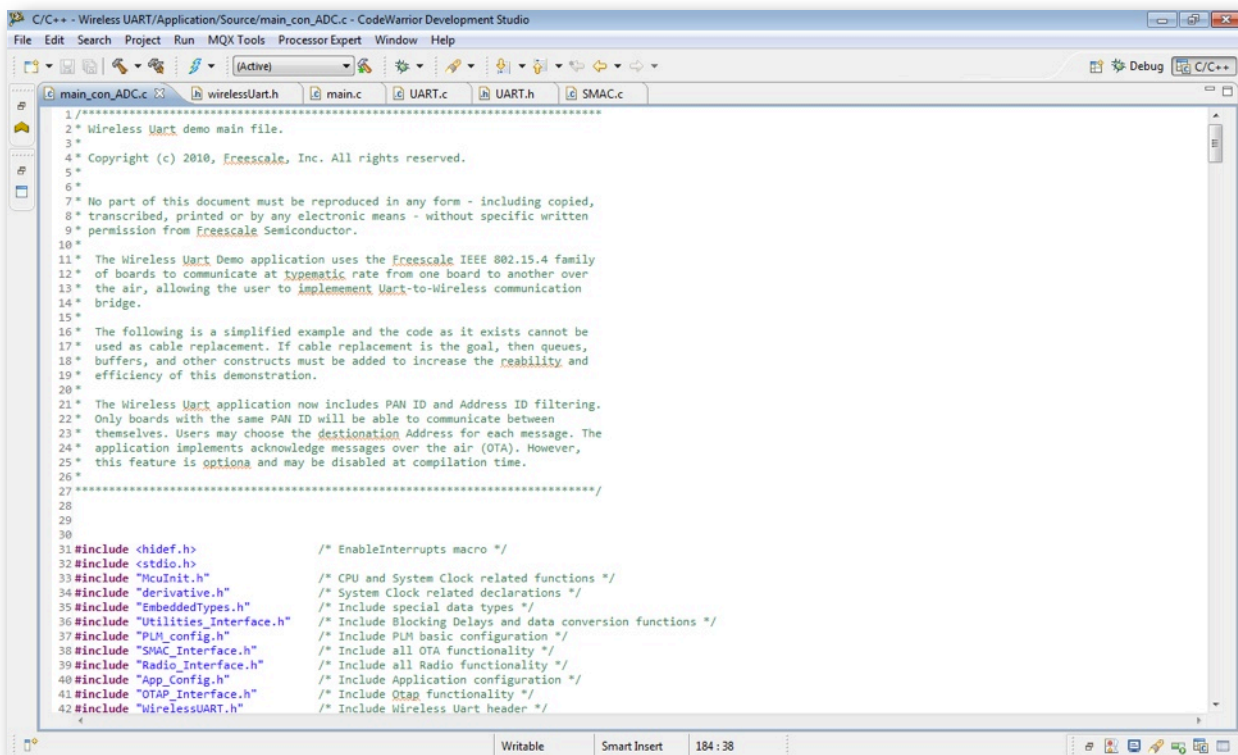


Figura 56. Captura de pantalla del menú de inicio de CodeWarrior

Los módulos XBEE venían configurados para hacer el envío y la recepción de datos introducidos por teclado. No obstante este código era muy amplio y no cumplía con las necesidades del proyecto. Por ello la mayor parte de este código ha sido cambiado y simplificado.

3.6.1. Diagrama de flujo XBee envío:

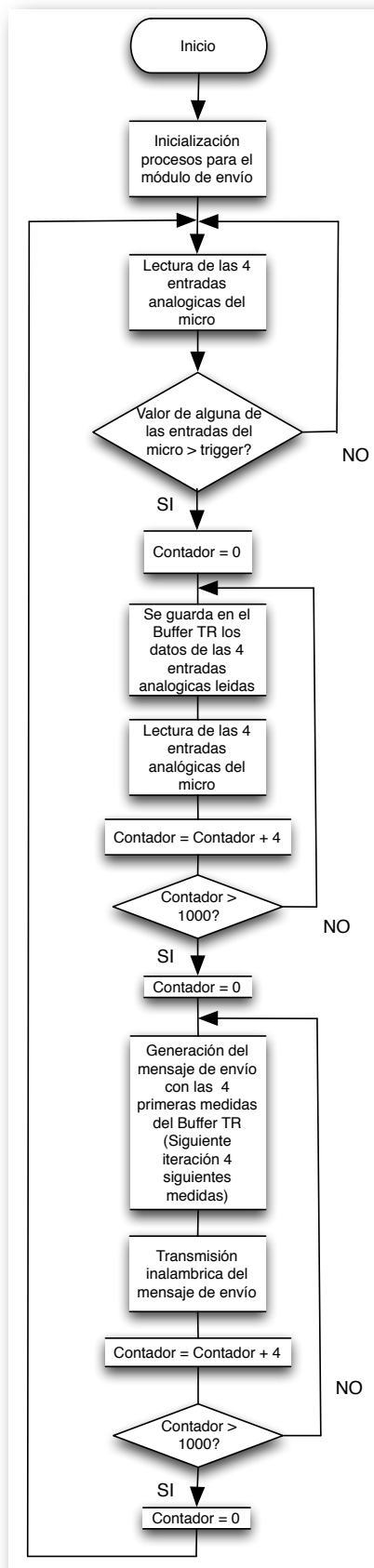


Figura 57 Diagrama de flujo XBee de envío

3.6.2. Diagrama de flujo XBee recepción:

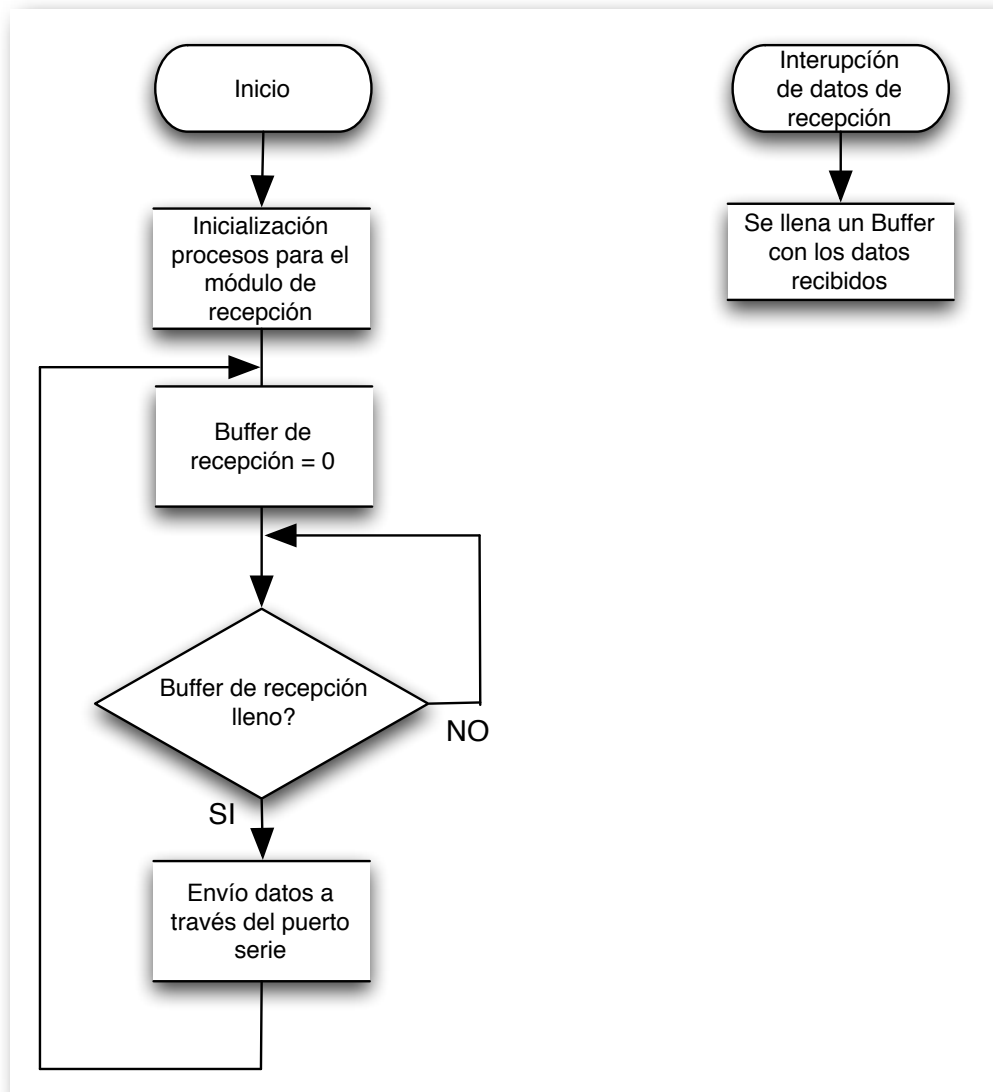


Figura 58: Diagrama de flujo XBee de recepción

3.7. Software para el procesamiento de datos y la visualización

Una vez que los datos entran satisfactoriamente por el puerto serie del ordenador es necesario una aplicación informática que procese estos datos y los ilustre. El software que se ha utilizado para esto es LABVIEW.

El panel que finalmente usa el usuario se ha dividido en 4 partes:

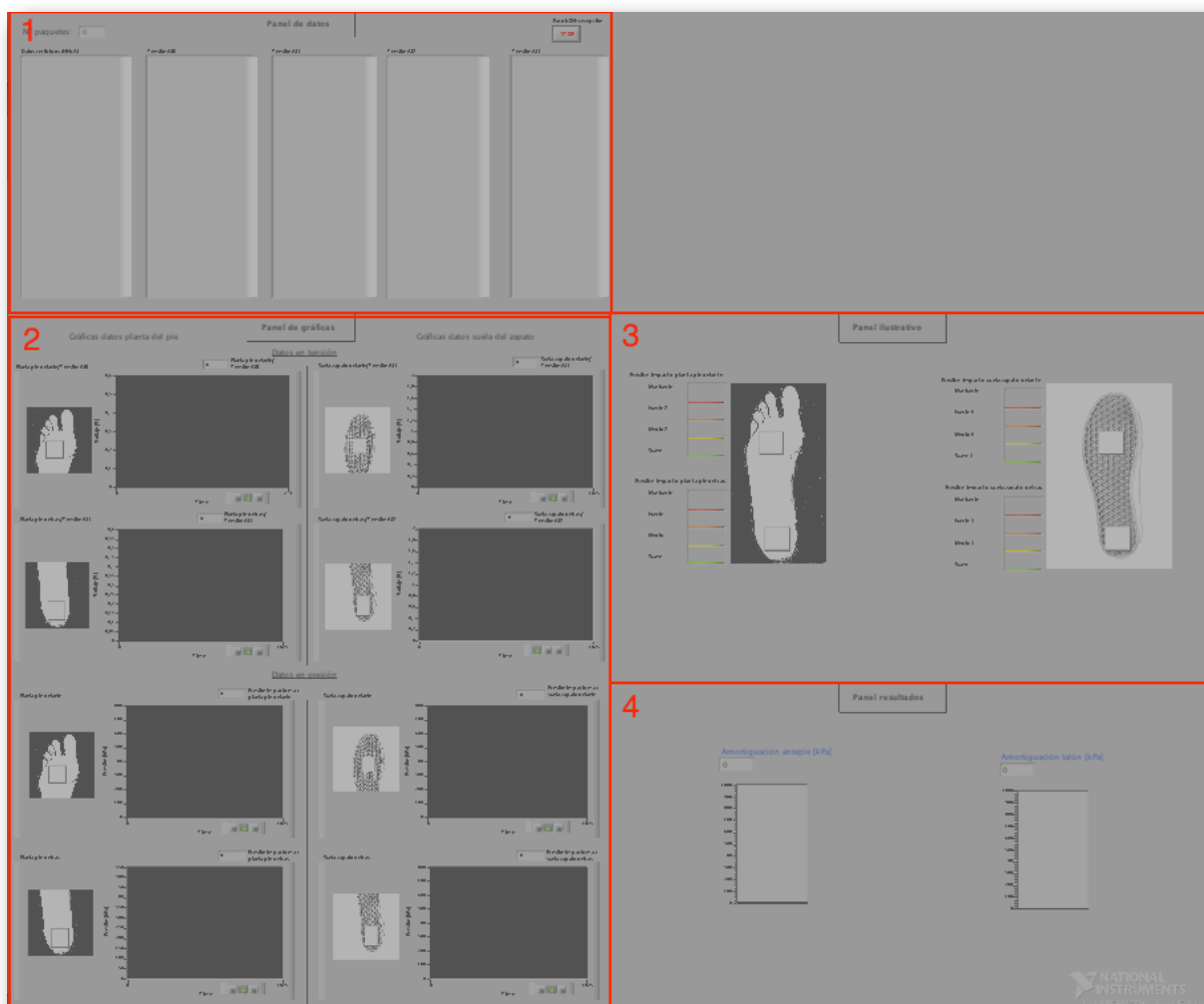


Figura 59. Visión de todos los paneles de la aplicación Labview

I. Panel de datos

Este panel esta pensado para en el caso de haber un envío erróneo o sospecho buscar los posibles motivos en los datos de llegada.

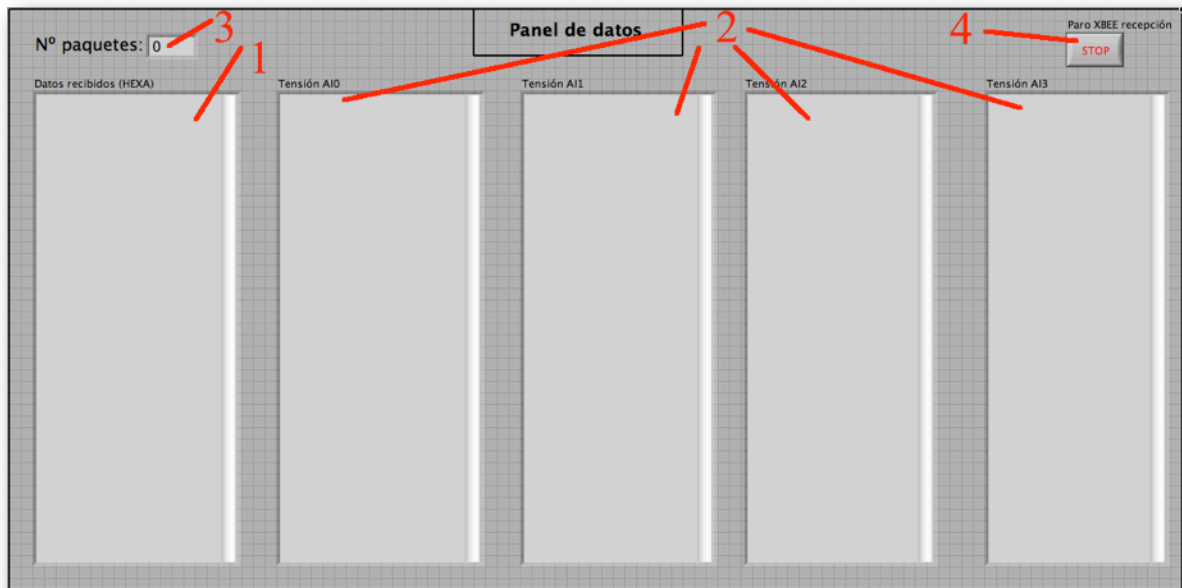


Figura 60: Panel de datos, Labview

En 1 aparecen los datos recibidos por Labview en forma hexadecimal sin ningún tipo de modificación.

En 2 los datos recibidos están desglosados según la entrada analógica y convertidos a tensión.

3 es un indicador del número de paquetes de datos que han llegado. Por cada envío el número debe de ser de 1000, en caso contrario se ha producido algún error y los datos que aparecen no deben de ser considerados como correctos.

Finalmente 4 es el botón para parar la aplicación de Labview.

2.Panel de gráficas

En esta parte del panel los datos recibidos se grafican para una visualización más cómoda. En la parte de “Datos en presión” la información esta tratada con distintos factores, entre ellos el extraído de la caracterización, para representar la información del impacto en unidades de presión. Además aparece el valor de la tensión y presión máxima de cada región.

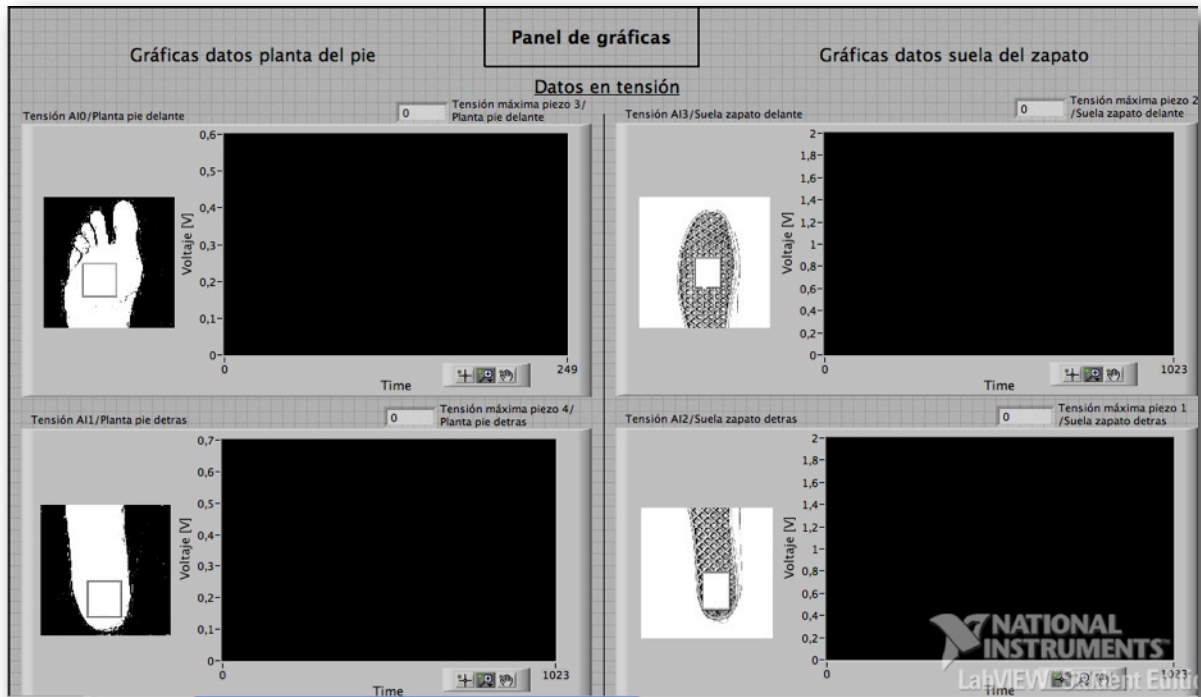


Figura 61: Panel de gráficas tensión, Labview

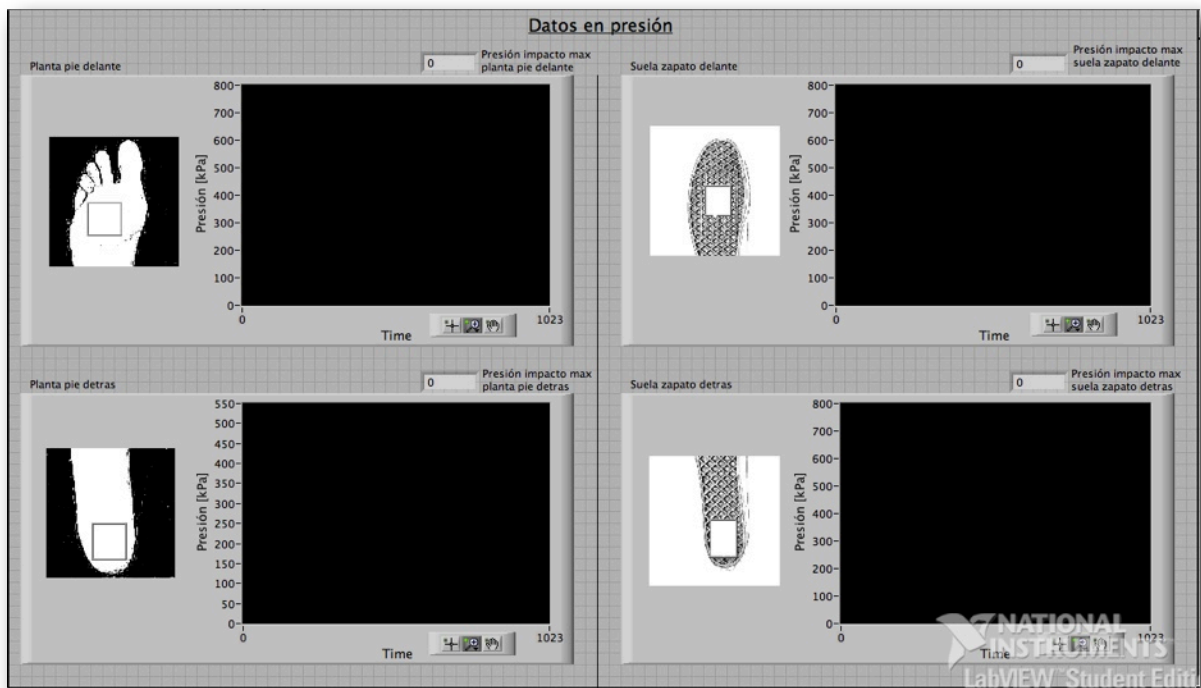


Figura 62: Panel de gráficas presión, Labview

3.Panel ilustrativo:

En este panel aparecen las presiones de manera ilustrativa.

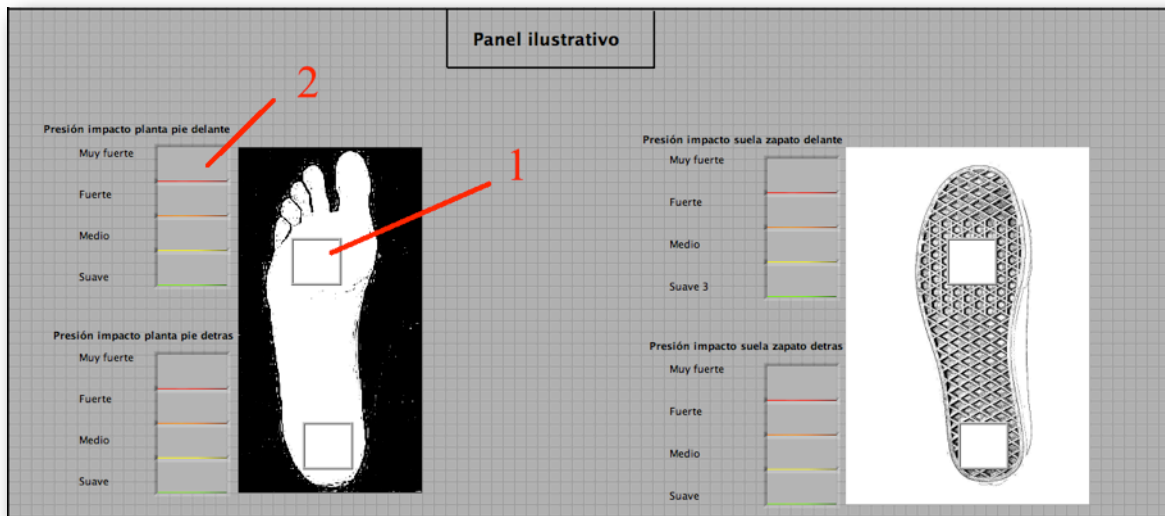


Figura 63: Panel ilustrativo, Labview

En 1 aparece una redonda de 4 posibles colores: Verde, amarillo, naranja y rojo.

En 2 aparece para dar mayor precisión 4 tanque de los mismos colores que las redondas.

Para escoger que color aparece con que presión se han creado intervalos obtenidos de hacer ensayos con diferentes alturas.

4.Panel de resultados

Finalmente en este panel se puede apreciar el amortiguamiento de la suela de zapato:

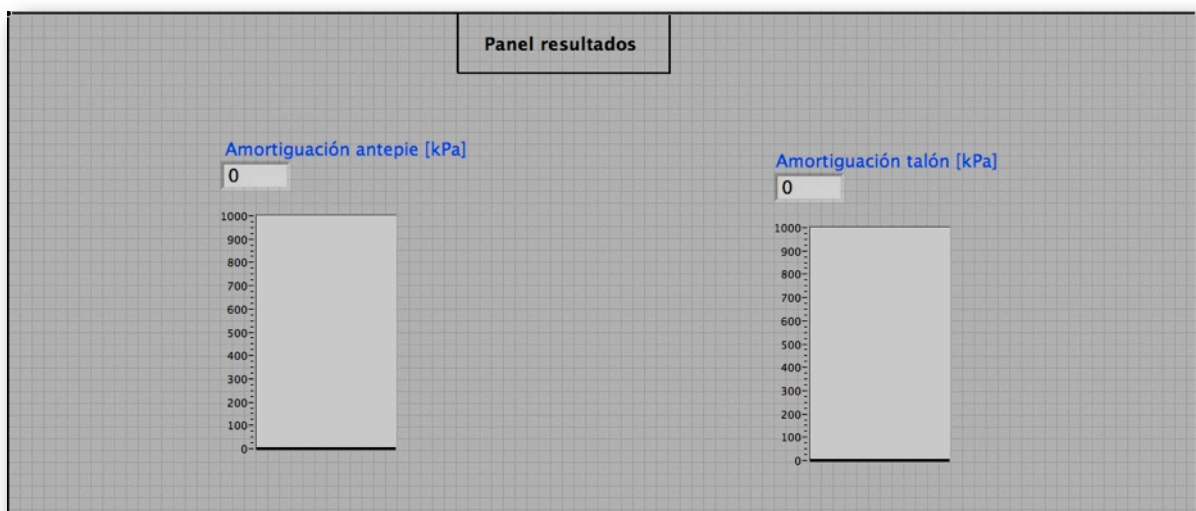


Figura 64: Panel de resultados, Labview

4. Proceso de caracterización

Uno de los temas que más dificultades y tiempo ha costado ha sido el tema de la caracterización de los sensores piezoeléctricos. Se ha invertido mucho tiempo pensando y probando métodos para hacer una caracterización correcta y adecuada al rango de fuerzas que finalmente se utilizaran los sensores. En este apartado están documentados cronológicamente los distintos métodos que se probaron antes de llegar a la manera definitiva.

Se ha visto útil incluirlos para prevenir que otras personas cometan los mismos errores y demostrar la precisión con la que es necesario trabajar para obtener una caracterización correcta.

4.1. Caracterización con pesos

Inicialmente el primero método mediante el cual se trató de caracterizar el sensor fue simplemente dejando caer un peso desde cierta altura.



Figura 65: Esquema caracterización con pesos



Figura 66: Peso utilizado para el ensayo

Inicialmente se intento este ensayo dejando caer el peso directamente con la mano. Rápidamente se observó que aparecían diferencias muy grandes en el voltaje de salida al repetir un mismo ensayo.

Se identifico como causante de las variaciones en el sistema el hecho de usar las manos para dejar caer el peso.

Para solventar este problema se utilizó la siguiente estructura:



Figura 67: Estructura con altura regulable

Esta estructura tiene una parte de madera que permite regular la altura. En esta parte de madera se fijó una llave inglesa. A los pesos se les colocó con pegamento un hilo situado exactamente en la mitad. En el ensayo se introducía el extremo del hilo entre las pinzas de la llave inglesa. Entonces una vez fijado el peso y el sensor piezoelectrico colocado debajo, se dejaba caer el peso y se medía la tensión.

Utilizando este método solo se consiguieron ensayos solo algo más repetibles. Se identifico como causante del problema el hecho que los pesos aunque se fijen con una cuerda al caer se giran ligeramente y no caen totalmente planos encima del sensor.

4.2.Caracterización con martillo

Dado que el método anterior presentaba demasiados problemas se pensó en un método en el que el peso estuviese del todo guiado. La primera idea para solventar esto era construir una torre con guías a los laterales. El peso se tendría que agujerear en los laterales para poder ser introducido en la torre. De esta manera se podría conseguir que el peso cayese siempre plano, con la misma superficie, encima del sensor. No obstante no se optó por esta opción ya que la construcción del sistema mencionado hubiese llevado un tiempo demasiado elevado.

En cambio se hizo un martillo angulado con posibilidad de cambiar el peso:

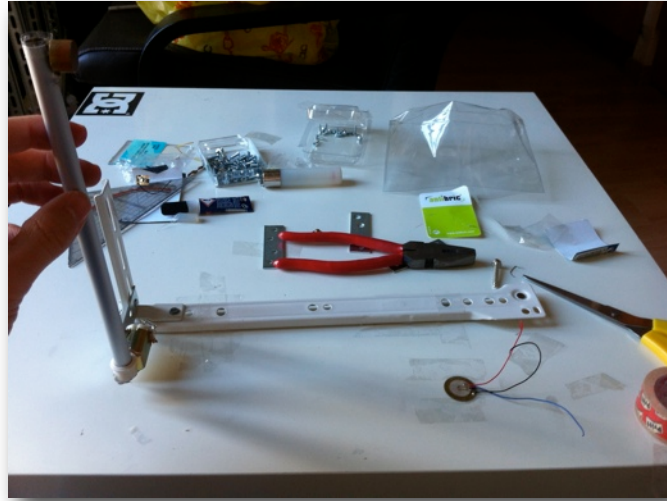


Figura 68: Martillo con peso en posición inicial

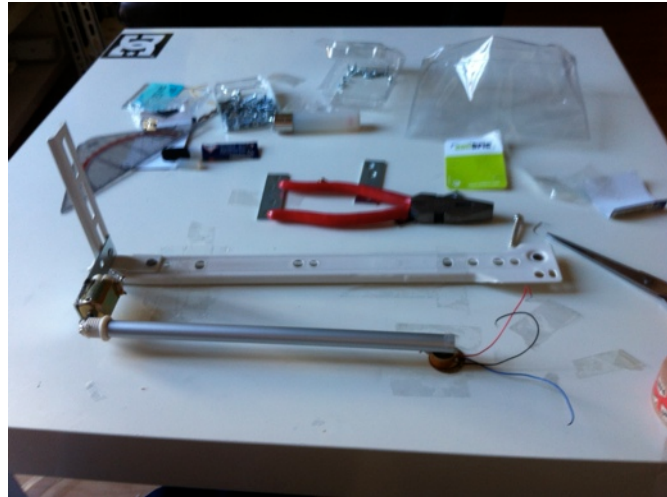


Figura 69: Martillo con peso en posición final

Problemática:

De nuevo dado aparecían diferencias en el voltaje al repetir un mismo ensayo, se supuso que esto sucedía dado a que el montaje era muy sencillo y no se conseguía inmovilizar al 100% toda la estructura.

4.3. Caracterización con bolas

Se había estado invirtiendo un tiempo considerable en tratar de resolver, sin éxito, el problema de la caracterización de los sensores y fue entonces cuando se empezó a tratar de contactar con empresas fabricantes de plantillas instrumentadas y institutos de biomecánica. Dado que al principio ninguno contestaba se empezó a buscar en artículos de investigación.

Al poco tiempo se decidió seguir el método utilizado por Joaquín del Río, Daniel Mihai Toma,... en el artículo X.

La idea era caracterizar los sensores dejando caer una bola de diferentes pesos de una plataforma de altura regulable. Lo positivo de este procedimiento era que aunque la bola se gire durante la caída la superficie de contacto con el piezo al impacto sería siempre exactamente la misma

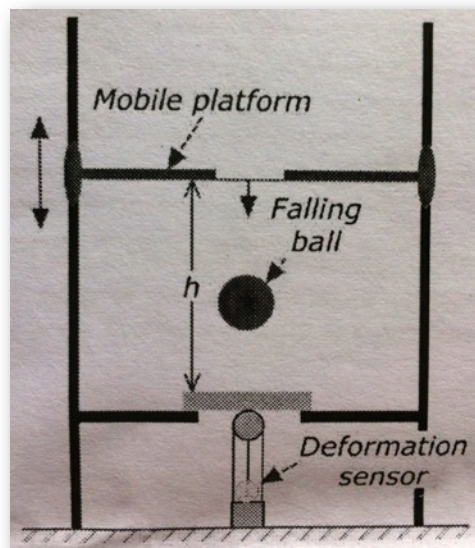


Figura 70: Esquema sistema de calibración

El sistema final utilizado para realizar la caracterización fue el siguiente:

4.3.1.Descripción del hardware

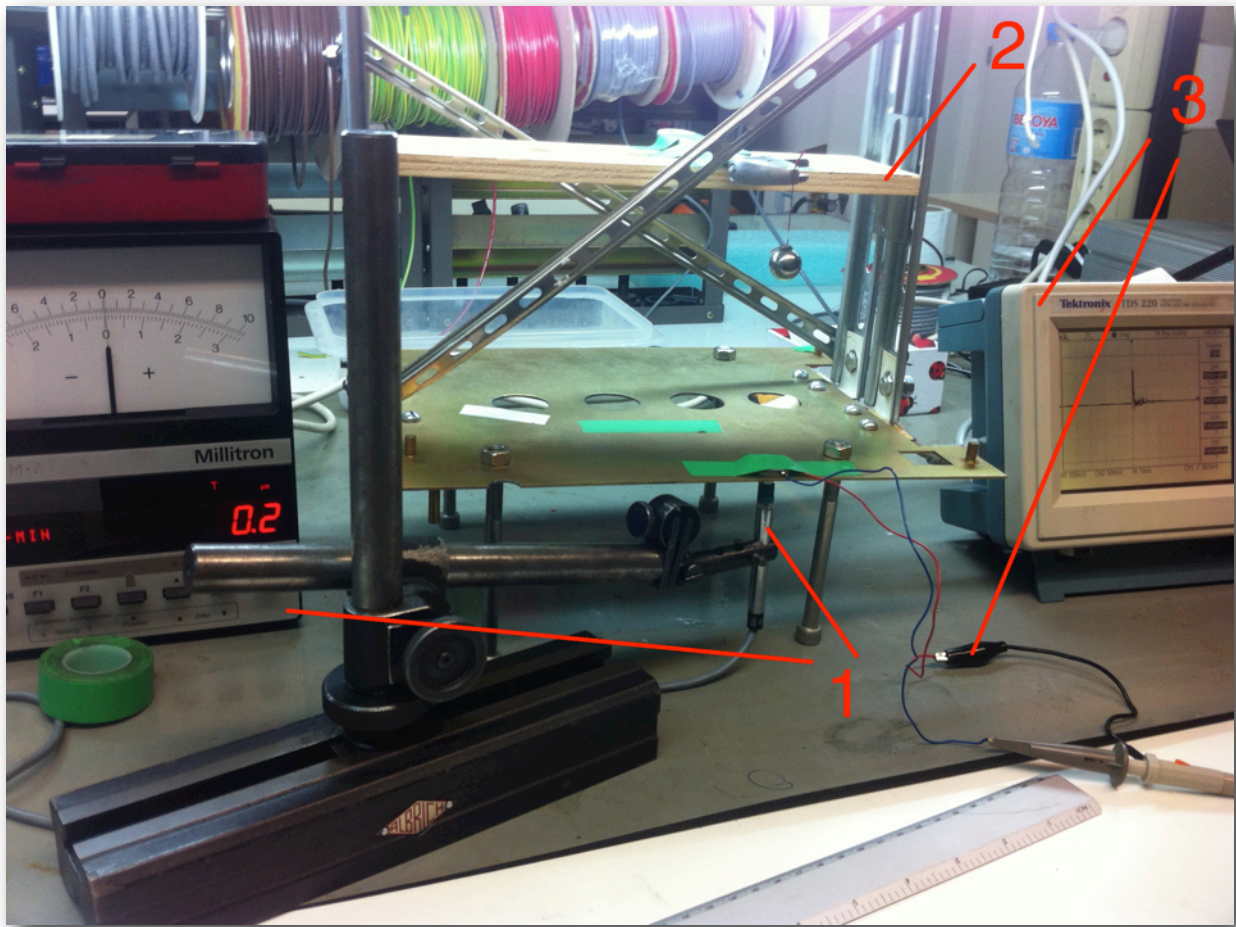


Figura 71: Sistema para la calibración

Donde:

- 1.Sensor de deformación "Mahr I 300"
- 2.Sistema para dejar caer bola con altura regulable
- 3.Osciloscopio "Tektronix TDS 220"

4.3.2.Cálculos teóricos:

A partir de la medición de la deformación y la altura se puede calcular la fuerza de impacto:

$$F = \frac{0,5 \cdot m \cdot v^2}{d}$$

Donde:

F: Fuerza del impacto

m: Masa

v: Velocidad del impacto

d: Deformación

La velocidad del impacto se calcula con la siguiente expresión:

$$v = \sqrt{m \cdot g \cdot h}$$

Donde:

v: Velocidad del impacto

m: Masa

g: Gravedad

h: Altura inicial

No obstante también se ha considerado que la bola cuando cae encima del sensor rebota. La formula anterior considera una caída sin rebote. Por lo tanto se ha calculado la altura del rebote y se ha restado a la altura inicial para tener la altura sin rebote.

La fórmula para calcular la altura del rebote es la siguiente:

$$h_{reb} = \frac{g}{2} \cdot \left(\frac{t}{2} \right)^2$$

Donde:

h_{reb} : Altura del rebote

t : Tiempo hasta el rebote

El tiempo del rebote se ha obtenido mediante la gráfica en el osciloscopio

Finalmente la expresión considerando las ecuaciones anteriores queda:

$$F = \frac{0,5 \cdot m^2 \cdot g \cdot \left(h - \frac{g}{2} \cdot \left(\frac{t}{2} \right)^2 \right)}{d}$$

Ejemplo:

Se deja caer la bola con $m=12\text{gr}$ desde una altura $h=7,5\text{cm}$ encima del piezo número 4. Al impactar se mide una deformación de $d=42,6\mu\text{m}$. En la gráfica del osciloscopio aparece un primer pico de tensión máximo de $1,9\text{V}$ y el tiempo que transcurre hasta el segundo pico de tensión es de $t=92\text{ms}$.

Con estos datos se calcula que $F = \frac{0,5 \cdot 0,012^2 \cdot 9,81 \cdot \left(0,075 - \frac{9,81}{2} \cdot \left(\frac{0,092}{2} \right)^2 \right)}{0,0000426} = 178,57\text{N}$

La relación $\frac{F}{V} = \frac{178,57}{1,9} = 93,98 \frac{\text{N}}{\text{V}}$

Por lo tanto el piezo número 4 por cada volt que da a la salida significa que hay $93,98\text{N}$ de impacto sobre él.

Explicaciones adicionales:

Después del montaje de los piezos se pudo observar que habían diferencias de tensión ante una misma fuerza de impacto. Esto se explica por las pequeñas diferencias que pudieron aparecer en el montaje, considerando que los sensores piezoeléctricos son altamente sensibles. Por lo tanto se ha hecho una caracterización para cada uno de los 4 piezos.

Sensor 1	Altura [cm]	Peso [gr]	V.peak [V]	Tiempo rebote [ms]	V. rebound [V]	Deformación [µm]	h reb [mm]	h no reb [cm]	Vel impact [m/s]	F impact [N]	F/V [N/V]	Media
	5,5	12	4,8	84	1,28	36,8	8,65242	4,634758	0,953592952784363	148,2616782	0,8428832727	0,8508407195
	7,5	12	5,2	92	1,44	42,6	10,37898	6,462102	1,12599465451755	178,57245245	0,8616136	
	10,5	12	6,31	114	0,56	62,3	15,936345	8,9063655	1,32190351807535	168,29170893	0,8482252857	
Sensor 2	Height [cm]	Weight [gr]	V.peak [V]	Time rebound [ms]	V. rebound [V]	Deformation [µm]	h reb [mm]	h non reb [cm]	Vel impact [m/s]	F impact [N]		
	5,5	12	0,44	80	0,288	36,8	7,848	4,7152	0,961832750534104	150,83514783	0,8573090909	0,8881536708
	7,5	12	0,448	92	0,443	42,6	10,37898	6,462102	1,12599465451755	178,57245245	0,8616136	
	10,5	12	0,536	99	0,128	62,3	12,01847625	9,298152375	1,35066557517951	175,69476292	0,8855383214	
Sensor 3	Height [cm]	Weight [gr]	V.peak [V]	Time rebound [ms]	V. rebound [V]	Deformation [µm]	h reb [mm]	h non reb [cm]	Vel impact [m/s]	F impact [N]		
	5,5	12	1,18	75	0,08	36,8	6,8976625	4,810234375	0,97147721763045	153,87521484	0,8745890882	0,8924807013
	7,5	12	1,42	80	0,168	42,6	7,848	6,7152	1,14783371618018	185,56651268	0,89536	
	10,5	12	2,4	89	0,68	62,3	9,71312625	9,528687375	1,36730701123596	180,05089531	0,9074940357	
Sensor 4	Height [cm]	Weight [gr]	V.peak [V]	Time rebound [ms]	V. rebound [V]	Deformation [µm]	h reb [mm]	h non reb [cm]	Vel impact [m/s]	F impact [N]		
	5,5	12	2,4	82	0,86	36,8	8,245305	4,6754695	0,957771954016195	149,56420368	0,8500853636	0,8609809045
	7,5	12	1,9	92	0,86	42,6	10,37898	6,462102	1,12599465451755	178,57245245	0,8616136	
	10,5	12	3	105	1	62,3	13,51940625	9,148059375	1,39371963988258	172,8586757	0,87124375	

Tabla 10: Tabla de caracterización por método de bolas

4.3.3.Montaje adicional piezos

Dado que la única manera de caracterizar los sensores era la antes mencionada se tuvo que ser consecuente. La idea era que en la caracterización la deformación que sufría el sensor era por curvatura. Si se usaba el sensor sin modificar cuando se colocaba en las plantillas y se pisaba la deformación no era la misma:

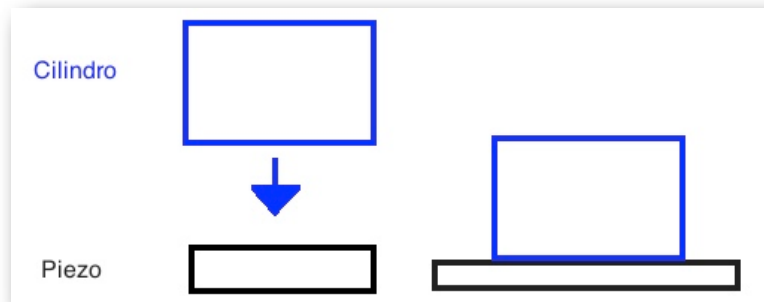


Figura 72: Deformación sobre toda la superficie del piezo

En cambio con una bola:

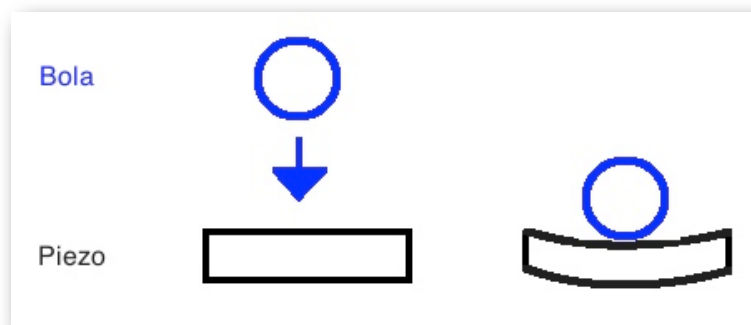


Figura 73: Esquema calibración con bola

Por ello se ingenio una manera en la que la deformación siempre fuese la misma:

Esquema:

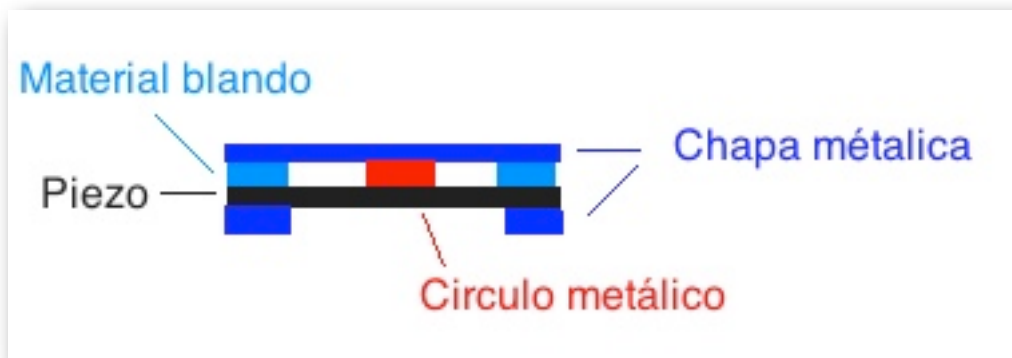


Figura 74: Esquema montaje final del piezo

Descripción hardware:



Figura 75. Montaje final sensor piezoeléctrico vista desde arriba, perfil y abajo

Donde:

1. Chapa metálica superior
2. Material blando
3. Circunferencia de chapa metálica
4. Sensor piezoeléctrico

Con esta construcción cuando el piezo recibía cualquier tipo de impacto, la deformación que sufría siempre era en forma de curvatura ya que debajo de la chapa metálica superior (I) hay un pequeño círculo metálico que aprieta el piezo. Por lo tanto se ha conseguido adaptar la caracterización al uso final del piezo en el que se presionaba toda la superficie.

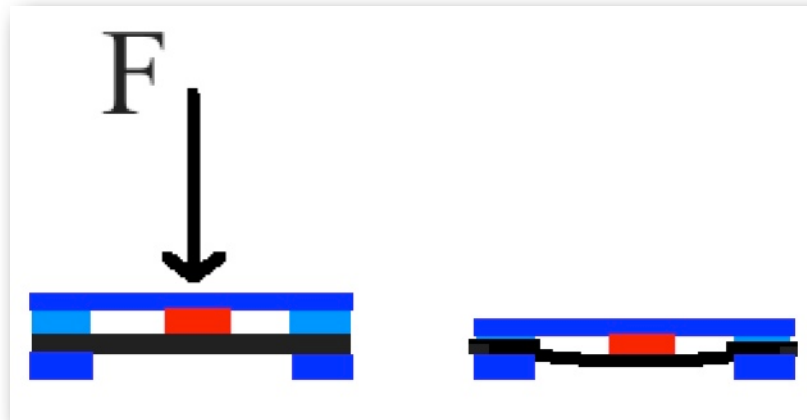


Figura 76: Impacto sobre el montaje final del piezo

Las versiones finales de los 4 sensores que inicialmente se usaron fueron los siguientes:

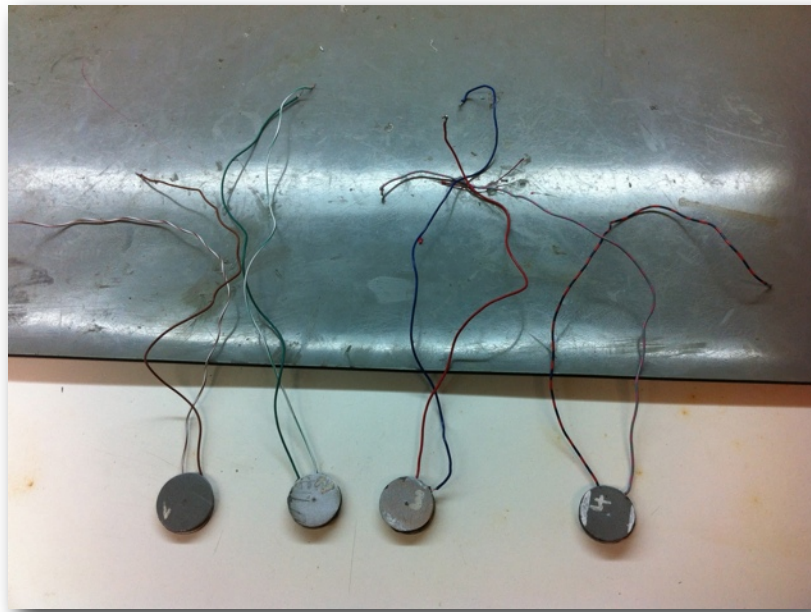


Figura 77: Montaje final todos los piezos, visión superior

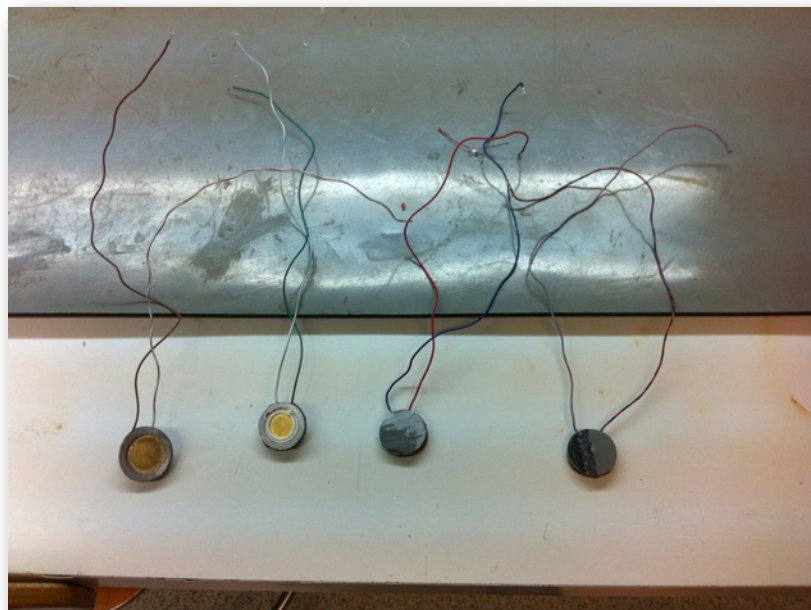


Figura 78: Montaje final todos los piezos, visión inferior

Nota:

Los sensores que en la visión de abajo tienen también una redonda de metal es por que estos se incluían dentro de la suela del zapato y como se quería que la parte central del sensor se pudiese deformar libremente en este caso se ha incluyó la chapita ya que en caso contrario la suela de dentro del zapato elástica estaría en contacto con la parte inferior.

4.3.4.Problemática:

Después de montar estos sensores dentro de las plantillas y hacer los primeros ensayos se observó que los valores de tensión que daban eran totalmente incoherentes comparado con los valores esperados.

La razón de estos resultados incorrectos es muy probablemente debido a que los sensores se caracterizaron para un rango de pesos muy pequeños (orden de gramos).

Finalmente ya después de esto, se consiguió contactar con el Instituto de Biomecánica de Valencia y se utilizó el sistema con la pistola de aire comprimido.

5.Conflicto teórico

Una vez finalizado el montaje de todo el sistema se ha hecho han hecho ensayos colocado una plantilla en la parte interior del zapato y otra plantilla en la suela del zapato. De esta manera se ha tratado de medir diferencias entre los valores de presión. La idea era que si por ejemplo la presión en la plantilla situada en el interior fuese más pequeña que la presión de la plantilla en la suela se podría concluir que ha sucedido una absorción del impacto. Incluso sería muy fácil de esta manera cuantificar exactamente cuanta amortiguación hubiese producido la suela de zapato. También permitiría utilizar el sistema en diferentes superficies con gran facilidad.

Sin embargo después de efectuar varios ensayos no se han podido observar grandes diferencias. Entonces se considero que el sistema tenía que presentar algún tipo de error. Al poco tiempo se contactó con Joan Sole, reconocido ingeniero mecánico de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova (EPSEVG), y se llegó a una fatídica conclusión: A nivel teórico tanto la fuerza en la parte inferior de la zapatilla como en la parte interior debe exactamente la misma.

La explicación de esto es muy sencillo:

El sistema se puede simplificar con el siguiente esquema:

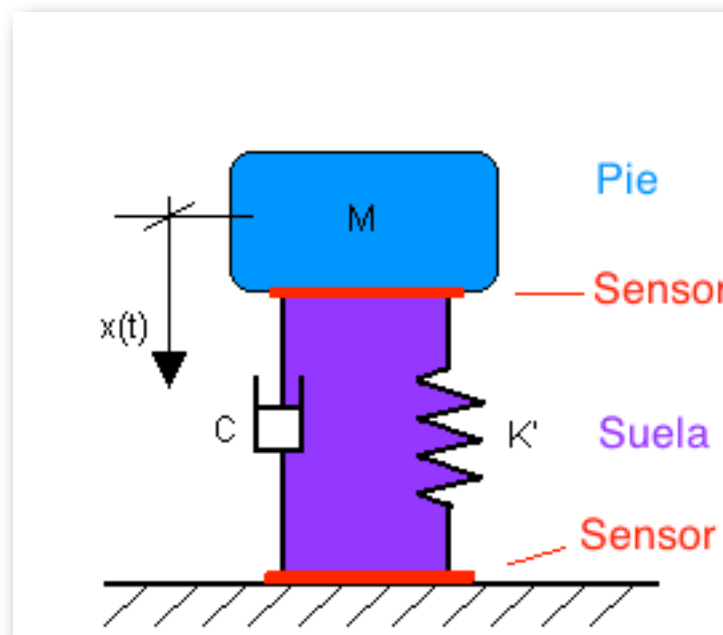


Figura 79: Esquema simplificado para hacer el análisis de las fuerzas

Según el 3er axioma de Newton "con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: quiere decir que las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto." Dicho de otra forma, las fuerzas, situadas sobre la misma recta, siempre se presentan en pares de igual magnitud y de dirección, pero con sentido opuesto. Por lo tanto la fuerza tanto en la parte superior como inferior del muelle es exactamente igual en cada momento del impacto. Así también lo son las fuerzas de reacción en el pie y en el suelo. Consecuentemente los sensores deberían de medir exactamente lo mismo en cada momento y cualquier diferencia medida viene dada por errores.

A pesar de que el sistema compacto finalmente no es efectivo y no permite la medición de la amortiguación producida por las suelas de zapato se ha visto beneficioso para la comunidad científica incluirlo. De esta manera cualquier persona que haya pensado en hacer lo mismo podrá ahorrarse el error. Por otro lado también puede ser extrapolado a otros proyectos el hecho de que cuando se trata de desarrollar un sistema nuevo es imprescindible al principio tratar de hacer la justificación a nivel de las fuerzas físicas.

Por otro lado el tiempo invertido no ha sido totalmente inútil ya que se ha creado un sistema de plantillas instrumentadas. Comprar un sistema así vale entre 2000 -16.000 euros y en este proyecto se ha conseguido hacer gastando menos de 50. Finalmente con este sistema se puede medir la amortiguación producida por diferentes suelas de zapato de manera indirecta siguiendo la metodología explicada en el apartado 2. Es decir únicamente se tiene que repetir un mismo ensayo varias veces con diferentes zapatillas. Se pensó incluso en realizar un estudio sobre la amortiguación producida por las suelas de zapato dado un impacto humano. No existe ningún estudio que haya hecho esto. No obstante dado que el error teórico apareció pocos días antes de la entrega del proyecto y la memoria e resumen IEEE ya estaban casi acabados y totalmente enfocados al tema del sistema compacto no dio tiempo para realizar el estudio mencionado.

6.Pruebas, resultados y discusión

6.1.Objeto de estudio:

DC Tonik S



Figura 80: DC Tonik S perfil 1



Figura 81: DC Tonik S perfil 2



Figura 82: DC Tonik S vista inferior



Figura 83: DC Tonik S vista detrás

6.2.Métodos

Se plantea un estudio descriptivo para evaluar las presiones planares en diferentes zonas del pie. El sujeto incluido en el estudio presenta un pie morfológicamente y funcionalmente normal. Se establece como pie normal aquel que no presenta alteraciones morfológicas o funcionales evidentes, que muestra una huella plantar normal y que no padece dolor en las condiciones de la vida diaria. La muestra esta compuesta por la persona de 24años y 58Kg de peso. Todas las mediciones se tomaron en un pasillo de 20metros. El sujeto fue calzado con la zapatilla deportiva "DC Tonik S" y el sistema de plantillas instrumentadas. Una vez listo se instaba al sujeto a caminar un par de minutos, con el objeto de que se familiarizara con el sistema y la sensación de llevar plantillas instrumentadas. Se comentaba al paciente que caminara a ritmo normal de paseo. Una vez habituado el sujeto a las condiciones de ensayo se realizaba el registro de datos. Durante la marcha en el pasillo el sujeto pulsaba el botón para efectuar la adquisición de datos siempre en el momento antes de realizar el paso con el pie que llevaba el sistema instrumentado.

6.3.Resultados

Media presión máxima

La variable que se pretendía evaluar en el estudio era la presión máxima. Después de realizar el ensayo 10 veces se llegaron a los siguientes valores de media de presión máxima:

Plantilla situada en suela del zapato:

Antepie: 779,44kPa

Talón: 716,1kPa

Plantilla situada en el interior del zapato:

Antepie: 719,12kPa

Talón :551,1kPa

Consecuentemente las diferencias:

Antepie: 60,32kPa

Talón: 164,99kPa

Muestra de uno de los ensayos realizados:

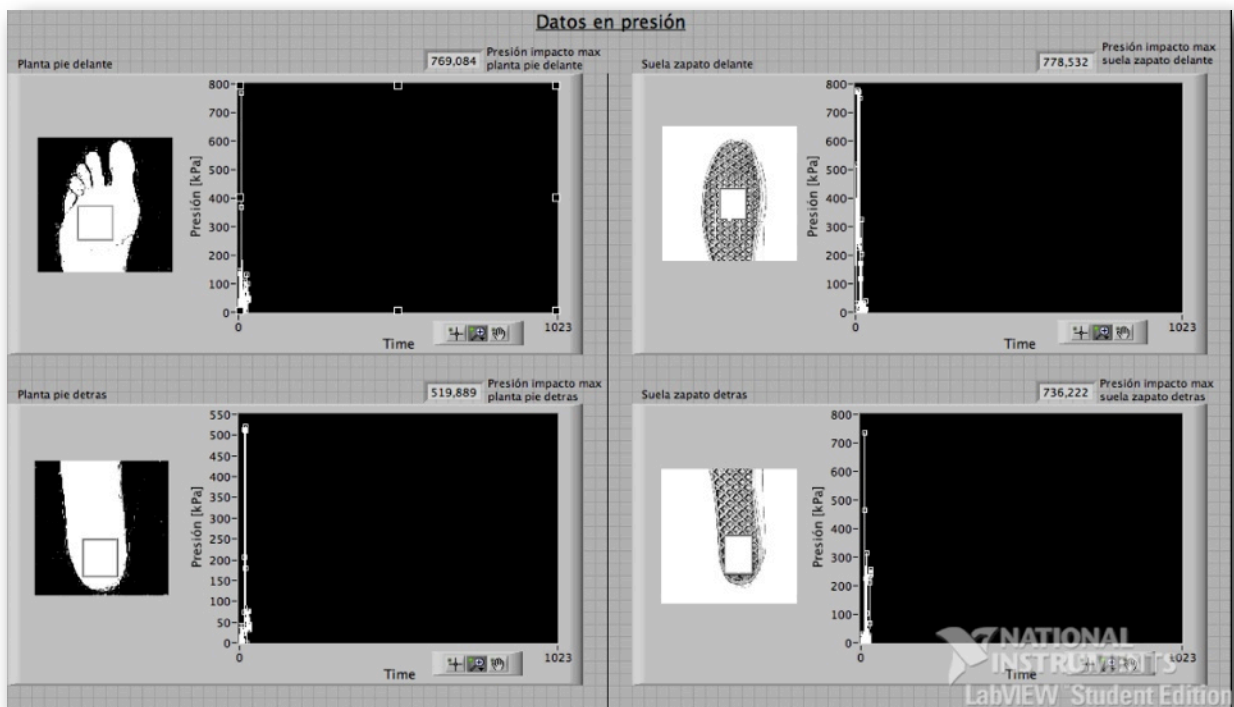


Figura 84: Resultados en el panel de Gráficas, aplicación Labview

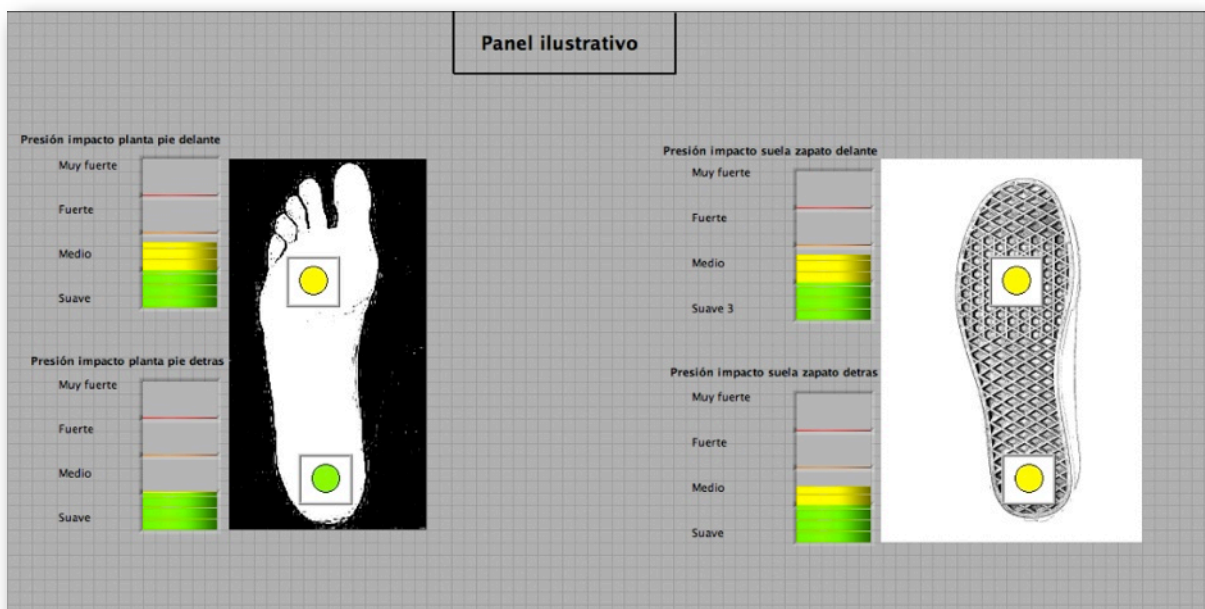


Figura 85: Resultados en el panel ilustrativo, aplicación Labview

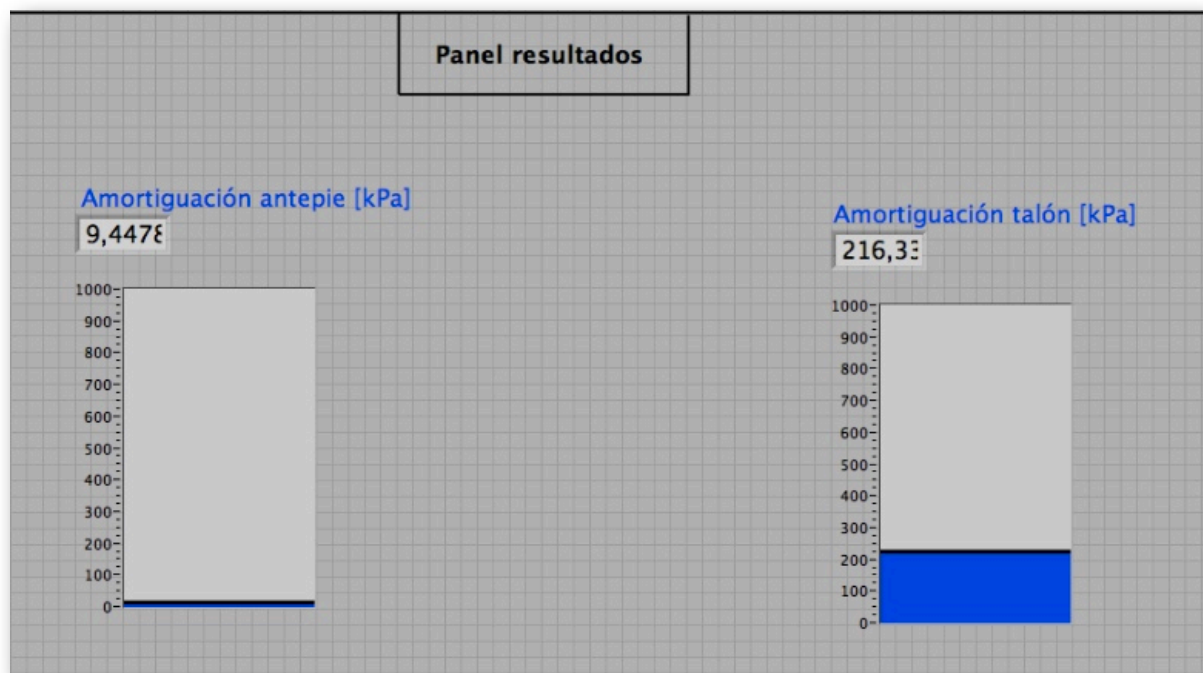


Figura 86: Resultados en el panel de resultados, aplicación Labview

6.4. Discusión

En el estudio “Estudio baropodométrico de los valores de presión plantar en pies no patológicos” efectuado por “Departamento de Enfermería. Centro Universitario de Plasencia. Universidad de Extremadura” se utilizaron las plantillas instrumentadas Biofoot del Instituto de Biomecánica de Valencia y se obtuvieron los siguientes resultados al medir las presiones que aparecían en los pies de distintos sujetos al caminar:

Resultados. La media del tiempo de contacto fue de 0,81 segundos (desviación estándar [DE] 0,08) en el pie derecho, y 0,82 segundos (DE 0,09) en el izquierdo. La cadencia fue de 105,6 (\pm 8,4) pasos por minuto. El pico máximo de presión y presión media en el retropié fue de 750 y 253 kPa, respectivamente. En el mediopié el pico de presión fue de 400 kPa y la presión media de 65 kPa. En el antepié los valores encontrados fueron de 1.240 kPa para el pico de presión y de 220 kPa para la presión media.

Figura 87: Extracto del “Estudio baropodométrico de los valores de presión plantar en pies no patológicos”

Tomando estos valores únicamente como una referencia se puede deducir que los valores de presión obtenidos pueden ser correctos. Para la exacta comprobación sería necesario hacer una comparativa con otro sistema de plantillas homologado ante el mismo ensayo

Consecuentemente el sistema parece ser válido para su utilización como sistema de plantillas instrumentadas.

Las diferencias medidas entre las dos plantillas se consideran como errores y se supone que son causadas por un comportamiento ligeramente diferente entre cada sensor.

7.Conclusiones

El objetivo de este proyecto era realizar un sistema compacto para la medición de las propiedades atenuadoras en zapatillas deportivas. Este objetivo en concreto lamentablemente no se ha podido cumplir. No obstante se ha conseguido crear un sistema inalámbrico de plantillas instrumentadas cuyas mediciones parecen ser correctas. Comprar un sistema así vale entre 2000-10000 euros y para este proyecto se ha gastado menos de 50 euros. Haber conseguido esto puede considerarse como un éxito. Con este sistema es posible la medición de las propiedades atenuadoras de manera indirecta tal. Como ya mencionado al principio del proyecto mediante el sistema inalámbrico de plantillas, si se hubiese dispuesto de más tiempo, se podría haber realizado un estudio sobre la amortiguación producida por las suelas de zapato dado un impacto vertical humano, estudio que actualmente no existe.

8. Bibliografía

Estudios consultados:

[1] Chiu, H.T., Shiang, T.Y., & Lin, D.C.. Cushioning properties of shoe-surface interfaces in different impact energies [en línea]. In J.R Blackwel (Eds.), Proceedings of the Oral Sessions XIX Proceedings of International Symposium on Biomechanics in Sports (pp. 207-210), San Francisco, America. (2001). [fecha de consulta: 15 de mayo del 2013]. Disponible en: <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/3890/3608>

[2] Hung ta Chiu . Using impact testing method to estimate the energy absorbed by insoles in sport shoes [en línea]. National Cheng Kung University, Tainan, Chinese Taipei. (2005). [fecha de consulta: 15 de mayo del 2013]. Disponible en: <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/download/1186/1073>

[3] Windle, C.M., Gregory, S.M., & Dixon, S.J. The shock attenuation characteristics of four different insoles when worn in a military boot during running and marching [en línea]. Gait and Posture, 9, 31-37. (1999). [fecha de consulta: 22 de mayo del 2013]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10575068>

[4] House CM, Waterworth C, Allsopp AJ, Dixon SJ . The influence of simulated wear upon the ability of insoles to reduce peak pressures during running when wearing military boots [en línea]. Gait and Posture. (2002). [fecha de consulta: 22 de mayo del 2013]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12443955>

[5] A. MARTÍNEZ-NOVAa, R. SÁNCHEZ-RODRÍGUEZa, J.C. CUEVAS-GARCÍAa Y E. SÁNCHEZ-BARRADOa,b. Estudio baropodométrico de los valores de presión plantar en pies no patológicos. [en línea] Departamento de Enfermería. Centro Universitario de Plasencia. Universidad de Extremadura. (2007). [fecha de consulta: 30 de mayo del 2013]. Disponible en: <http://www.elsevier.es/es/revistas/rehabilitacion-120/estudio-baropodometrico-los-valores-presion-plantar-pies-13109416-originales-2007>

[6] Aoife Healy*, Philip Burgess-Walker, Roozbeh Naemi, Nachiappan Chockalingam. Repeatability of WalkinSense® in shoe pressure measurement system: A preliminary study [en línea] (2001). [fecha de consulta: 22 de mayo del 2013]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958259211001088>

[7]. Hongsheng Zhu, Gerald F. Harris, Jacqueline J. Wertsch Willis J. Tompkins, and John G. Webster. A Microprocessor-Based Data-Acquisition System For Measuring Plantar Pressures from Ambulatory Subjects [en línea]. (1991). [fecha de consulta: 22 de mayo del 2013]. Disponible en: <http://minds.wisconsin.edu/handle/1793/9624>

[8]. Abdul Hadi Abdul Razak, Aladin Zayegh, Rezaul K. Begg and Yufridin Wahab. Foot Plantar Pressures Measurement System: A Review [en línea] (2012). [fecha de consulta: 22 de mayo del 2013]. Disponible en: www.mdpi.com/1424-8220/12/7/9884/pdf

[9] Instituto de Biomecánica de Valencia. Patente plantillas instrumentadas para medir presiones. Oficina española de patentes y marcas. Fecha de presentación: 17.11.92.

Productos relacionados:

[10]Novel. Pedar-X [en línea]. [fecha de consulta: 28 de mayo del 2013] .Disponible en http://novel.de/pdf/flyer/eng/pedarX_eng.pdf

[11]Instituto de Biomecánica de Valencia. Biofoot Plantillas instrumentadas [en línea]. [fecha de consulta: 28 de mayo del 2013] .Disponible en http://www.ibv.org/index.php/es/productos/aplicaciones-biomecanicas/show_product/99/8

[12]Novel. Emed-systems [en línea]. [fecha de consulta: 28 de mayo del 2013] Disponible en <http://www.novel.de/novelcontent/emed>

[13]Instituto de Biomecánica de Valencia. Dinascan/IBV - Plataformas dinamométricas [en línea]. [fecha de consulta: 28 de mayo del 2013]. Disponible en http://www.ibv.org/index.php/es/productos/aplicaciones-biomecanicas/show_product/99/10

[14]Instron. ElectroPuls Electrodynamic Test Instrument [en línea]. [fecha de consulta: 25 de mayo del 2013]. Disponible en; <http://www.instron.com.es/wa/product/ElectroPuls-All-Electric-Dynamic-Test-Systems.aspx?ref=http://www.google.com/url>

[15]. Digi. XBee 802.15.4 [en línea]. [Fecha de consulta: 3 de julio del 2013]. Disponible en: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-series1-module#docs>

[16].Freescale. MC1323x [en línea]. [fecha de consulta: 3 de julio del 2013]. Disponible en: http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MC1323x.pdf

Otros:

[17]Colaboradores de Wikipedia. Acelerómetro [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2013 [fecha de consulta: 3 de julio del 2013]. Disponible en <<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Aceler%C3%B3metro&oldid=64851847>>.

[18]Colaboradores de Wikipedia. Piezoelectricidad [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2013 [fecha de consulta: 3 de julio del 2013]. Disponible en <<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Piezoelectricidad&oldid=66844230>>.

[19]ASTM International. ASTM F1614 [en línea]. Standart Test Method for shock Attenuating Properties of Materials Systems for Athletic Footwear. [fecha de consulta: 3 de julio del 2013]. Disponible en: <<http://www.astm.org/Standards/F1614.htm>>